

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Konstrukce a výroba odvalovací frézy pro obrábění vložené hřídele

Design and Production of Hob for Inserted Shaft Machining

Student:
Vedoucí diplomové práce:

Bc. Petr Havelka
doc. Dr. Ing. Ivan Mrkvica

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Havelka**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Konstrukce a výroba odvalovací frézy pro obrábění vložené hřídele**
Design and Production of Hob for Inserted Shaft Machining

Zásady pro vypracování:

1. Charakteristika evolventního šneku.
2. Výpočet profilu nástroje včetně modifikace pro sražení hran.
3. Stanovení konstrukčních parametrů odvalovací frézy.
4. Kontrola řezné geometrie nástroje.
5. Výrobní postup včetně tepelného zpracování.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ŠVEC, S. *Konstrukce nástrojů pro výrobu čelních ozubených kol*. 1. vydání, Praha : SNTL Praha, 1965, 362 s.
- [2] ŠVEC, S. *Řezné nástroje*. 2. vydání, Praha : ČVUT Praha, 1970, 368 s.
- [3] MRKVICA, M. *Konstrukce a výroba obráběcích nástrojů*. 1. vydání, Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 1986, 215 s.
- [4] BAUSCH, T. *Innovative Zahnradfertigung*, 3. vydání, Renningen: expert verlag, Kontakt und Studium, Band 175, 2006, 778 S. ISBN 3-8169-1871-9.
- [5] NORMY, PROSPEKTY, KATALOGY.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr.Ing. Ivan Mrkvica**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 21.5.2012

Havelka Petr

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5.2012

Havelka Petr
.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Petr Havelka

Adresa trvalého pobytu autora práce: Nový Jičín, Beskydská 240

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HAVELKA, P. *Konstrukce a výroba odvalovací frézy pro obrábění vložené hřídele: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012, 87 s. Vedoucí práce: Mrkvica, I.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem konstrukčního řešení a technologií výroby odvalovací frézy. Úvod shrnuje možnosti využití technologie odvalovacího frézování. Konstrukční provedení jednotlivých částí nástroje je podrobně rozpracováno na základě teoretických poznatků, doplněných zpřesňujícími výpočty pro geometrii břitu, zahrnující tvar zubu a modifikaci profilu zubu frézy. Tyto poznatky jsou následně aplikovány na konkrétní řešení. Navržená odvalovací fréza zohledňuje konstrukční odlišnosti od klasických frézovacích nástrojů. V části zaměřené na výrobu jsou podrobněji zmíněny stěžejní výrobní operace, které mají rozhodující vliv na kvalitu odvalovací frézy. Zdůrazněny jsou hlavně operace podsoustružení a broušení profilu frézy s ohledem na dosažení maximální přesnosti nástroje.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

HAVELKA, P. *Design and Production of Hob for Inserted Shaft Machining: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working and Assembly, 2012, 87 p. Thesis head: Mrkvica, I.

This thesis deals with the structural design and manufacturing technology of hob. The introduction summarises the possibilities of hobbing technology. The structural design of single tool parts is detailed elaborated on the base of theoretical knowledge, which are improved by calculation of cutting edge geometry, including tooth shape and modification of hob tooth profile. These findings are subsequently applied to specific intent. The designed hob considers the construction differences from conventional milling cutter. The main manufacturing operations which have the predominant influences on hob quality are described in detail in the chapter related to manufacturing. The main accent is focused on relief and grinding of hob profile operation with respect to maximal toll precision.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	7
ÚVOD – CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	11
1 PŘÍDAVNÝ PŘEVOD A VLOŽENÁ HŘÍDEL	12
1.1 Vložená hřídel	13
2 KONSTRUKCE ODVALOVACÍ FRÉZY	17
2.1 Základní profil a evolventní šnek	18
2.2 Stanovení základních rozměrů odvalovací frézy	20
2.3 Stanovení počtu chodů a hřebenů odvalovací frézy	24
2.4 Stanovení výrobních rozměrů nemodifikované dokončovací odvalovací frézy	28
2.5 Stanovení skoku vačky a geometrie břitu odvalovací frézy	31
3 MODIFIKOVANÉ PROFILY ODVALOVACÍCH FRÉZ	39
3.1 Stanovení modifikovaného profilu odvalovací frézy pro srážení hran	39
3.2 Vliv doplňujících konstrukčních parametrů ozubení na hodnotu h_{FPO}	46
3.3 Modifikovaný profil odvalovací frézy pro zhotovení výstupní vůle	50
4 NÁVRH ODVALOVACÍ FRÉZY	52
4.1 Výpočet základního profilu nástroje	52
4.2 Výpočet průměru, počtu hřebenů a chodu navrhované odvalovací frézy	53
4.3 Výpočet základních konstrukčních parametrů a geometrie břitu navrhované frézy	57
4.4 Výpočet osového profilu navrhované frézy	59
4.5 Výpočet řezné drážky navrhované frézy	62
4.6 Určení doplňujících rozměrů a parametrů navrhované frézy	67
4.7 Shrnutí volených a vypočtených rozměrů navrhované frézy	69
4.8 Výkresová dokumentace navrhované odvalovací frézy	69
5 TECHNOLOGIE VÝROBY ODVALOVACÍ FRÉZY	70
5.1 Třískové opracování	70
5.2 Tepelné zpracování	74
5.3 Broušení	76
5.4 Rámcový technologický postup výroby odvalovací frézy	81
6 ZÁVĚR	83
PODĚKOVÁNÍ	85
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	86
SEZNAM PŘÍLOH	87

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

H	Osové stoupání frézy	[mm]
H_n	Osové stoupání řezných drážek frézy	[mm]
W_{FK}	Výchozí vzdálenost mezi osami frézy a brusného kotouče	[mm]
W_{FKL}	Limitní vzdálenost mezi osami frézy a brusného kotouče	[mm]
c	Radiální vůle	[modul]
d	Průměr roztečné kružnice ozubení	[mm]
d_a	Průměr hlavové kružnice ozubení	[mm]
d_{a0}	Hlavový průměr frézy	[mm]
d_b	Průměr základní kružnice ozubení	[mm]
d_{bK}	Průměr základní kružnice sražení	[mm]
d_{Fa}	Průměr počátku sražení zubů ozubeného kola	[mm]
d_f	Průměr patní kružnice ozubení	[mm]
d_{f0}	Patní průměr frézy	[mm]
d_0	Roztečný průměr frézy	[mm]
d'_a	Hlavový průměr nové frézy	[mm]
$ev\alpha$	Evolventní funkce alfa	[rad]
f_a	Rychlost axiálního posuvu frézy	[mm·ot ⁻¹]
h	Hloubka řezu	[mm]
h_{aPO}	Výška hlavy zubu frézy	[mm]
h_{FfPO}	Vzdálenost mezi referenční přímkou profilu a počátkem modifikace	[mm]
h_K	Výška sražení zubu ozubeného kola	[mm]
h_{1max}	Maximální tloušťka odřezávané třísky	[mm]
i_c	Počet cyklů na jednu otáčku frézy	[-]
i_0	Počet hřebenů frézy	[-]
k	Skok radiální vačky	[mm]
k_t	Skok teoretické radiální vačky	[mm]

k_1	Skok radiální odlehčovací vačky	[mm]
$k_{2\pi}$	Velikost radiální vačky na celou otáčku frézy	[mm]
m	Modul	[mm]
m_{a0}	Osový modul odvalovací frézy	[mm]
m_t	Čelní modul ozubeného kola	[mm]
m_{t0}	Čelní modul odvalovací frézy	[mm]
p_a	Parametr šroubové plochy	[mm]
r_d	Poloměr zaoblení řezné drážky	[mm]
r_{fd}	Patní poloměr řezných drážek	[mm]
r_g	Poloměr základního válce evolventního šneku	[mm]
r_{kot}	Poloměr brusného kotouče	[mm]
s	Dráha	[mm]
s_K	Šířka sražení zubu ozubeného kola	[mm]
t	Výrobní tolerance ozubení	[mm]
t_a	Osová rozteč závitu frézy	[mm]
t_h	Čas obrábění	[min]
t_{n0}	Rozteč frézy v normální rovině	[mm]
v_c	Řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
x	Jednotkové posunutí základního profilu	[mm]
x_{ai}	Souřadnice bodu osového profilu frézy	[mm]
x_{kot}	Souřadnice šířky brusného kotouče	[mm]
y_{ai}	Souřadnice bodu osového profilu frézy	[mm]
z	Počet zubů ozubeného kola	[-]
z_0	Počet chodů frézy	[-]
Δ_s	Přídavek pro broušení na bok zubu	[mm]
Δ_{xaz}	Zůstatková šířka zubu na hlavě odostřené frézy	[mm]
α	Úhel záběru	[rad], [°]

α_{Bn}	Normální úhel hřbetu na boku zubu	[rad], [°]
α_H	Úhel hřbetu na hlavě zubu frézy	[rad], [°]
α_{Ht}	Technologický úhel hřbetu	[rad], [°]
α_{KP0}	Úhel břitu srážení v základním profilu frézy	[rad]
α_t	Čelní úhel záběru ozubeného kola	[rad]
α_{ti}	Čelní úhel záběru ozubeného kola pro zvolený poloměr r	[rad]
α_{tK}	Čelní úhel záběru srážecího břitu na roztečném válci	[rad]
α_{tr}	Čelní úhel záběru evolventního šneku pro zvolený poloměr r	[rad]
α_{t0}	Čelní úhel záběru frézy na roztečném válci	[rad]
α'_H	Volený úhel hřbetu na hlavovém průměru frézy	[rad], [°]
β_{H0}	Úhel sklonu řezných drážek na roztečném válci	[rad]
β_{zz}	Úhel zůstatku zubu	[rad], [°]
β_o	Sklon zubu ozubeného kola	[rad], [°]
γ_g	Úhel stoupání šroubovice na základním válci	[rad], [°]
γ_o	Úhel stoupání závitu frézy	[rad], [°]
δ	Úhel vymežující počátek modifikace	[rad]
δ_s	Úhel vymežující šířku sražení	[rad]
δ_x	Hloubka stopy od axiálního posuvu	[mm]
δ_y	Odchylka obálkové sítě od evolventy	[mm]
ε	Úhel podbroušení zubu frézy	[rad]
ε_{kl}	Úhel napojení odlehčovací vačky	[rad]
η	Úhel natočení frézy	[rad], [°]
η_{kot}	Úhel natočení brusného kotouče	[rad], [°]
ϑ	Úhel rozevření řezné drážky	[rad], [°]
ι	Úhel pootočení bodu břitu z osového řezu frézy	[rad]
ν	Úhel maximálního pootočení frézy	[rad]
ξ	Úhel počátku broušení zubu frézy	[rad]

ξ_L	Koncový úhel broušení	[rad]
ρ	Poloměr zaoblení břitu frézy	[modul]
χ	Úhel mezi hřebeny frézy	[rad]
ψ	Úhel mezi počátkem a koncem sražení	[rad]
ω	Úhel určující kontakt srážecího břitu a obrobku	[rad]

ÚVOD – CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Převod ozubenými koly patří pro své vlastnosti mezi nejčastěji používané mechanické převody. Spolehlivá funkce, vysoká životnost a účinnost jsou vlastnosti, které zaručují uplatnění tohoto převodu i v následujícím období.

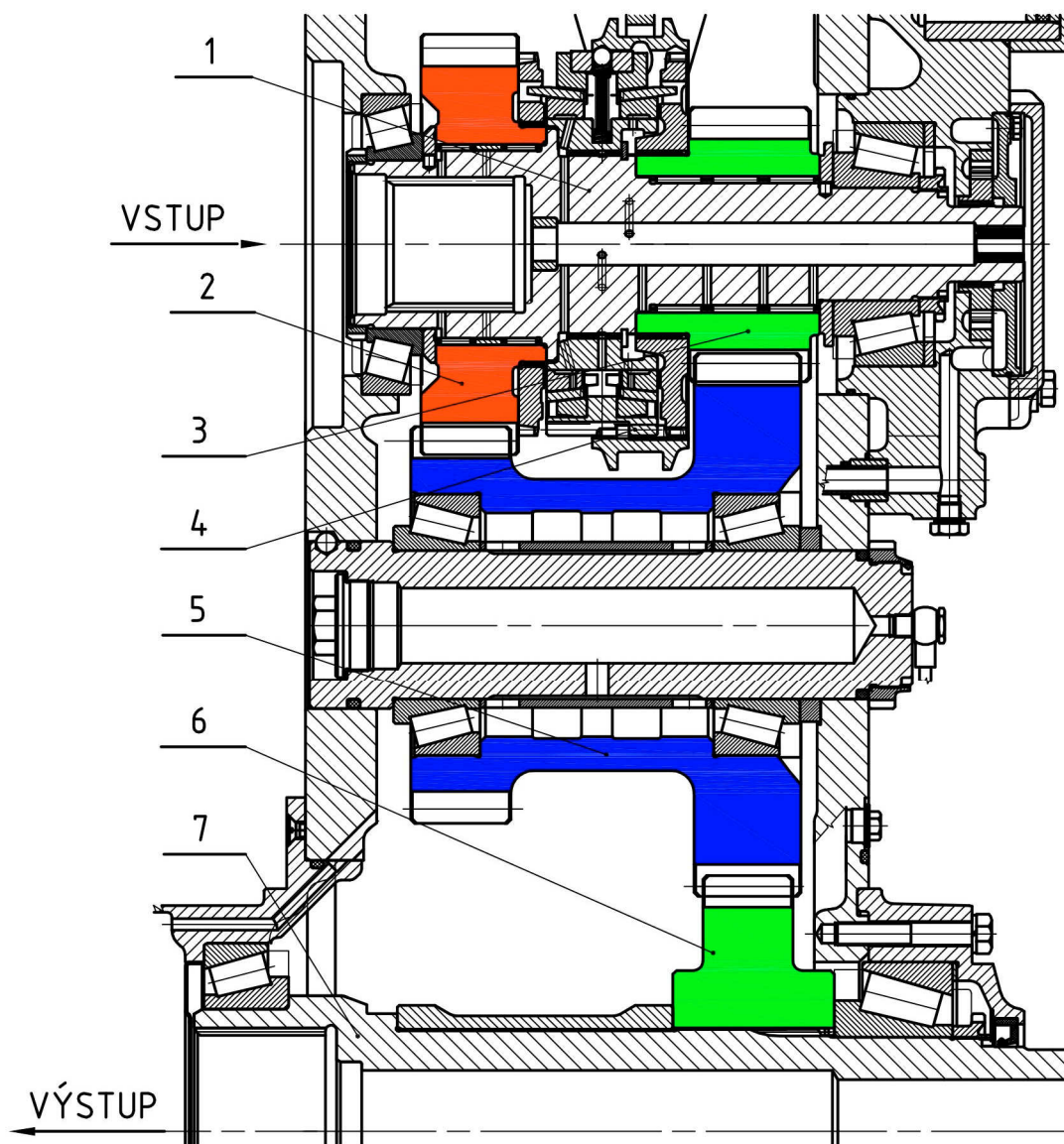
Stále vyšší nároky kladené na ozubená kola vyvolávají požadavky na zvýšení kvality výroby. Výroba se tím stává složitější a vyžaduje speciální nástroje a obráběcí stroje. Nejen kvalita výrobku, ale také ekonomika výroby upřednostňuje využívání produktivních metod obrábění. Mezi technologie obrábění, které tyto požadavky splňují, můžeme zařadit odvalovací obrábění. U výroby vnějších ozubených kol jsou nejčastěji využívány technologie odvalovacího frézování a obrážení. Preferovanou metodou, je-li to technicky možné, je odvalovací frézování. Hlavní výhody, které tato technologie přináší, jsou především vysoká produktivita, možnost automatizace, dosažení přijatelné kvality struktury a drsnosti povrchu, ale také ekologické aspekty u suchého obrábění.

Omezujícím faktorem této metody je tvar obrobku z hlediska technologického prostoru pro náběh a výběh frézy. Toto omezení lze v mnoha případech úspěšně řešit vhodnou konstrukcí obrobku, například zhotovením jednotlivých ozubených kol samostatně a jejich následnou montáží do požadovaného celku. Nezanedbatelný vliv na kvalitu výrobků má u tohoto typu obrábění odvalovací fréza. Konstrukční provedení odvalovací frézy ovlivňuje parametry frézování a tím i celkový výkon obráběcího stroje. Snaha o optimalizaci obráběcího procesu vede k neustálému tlaku na zvyšování obráběcích parametrů odvalovacích fréz, což se projevuje ve zvyšující se konstrukční a technologické náročnosti provedení nástroje a tím i jeho ceny. Zvýšení ceny nástroje je kompenzováno zvýšenou životností a zkrácením výrobního času, proto se toto zvýšení ceny u sériové výroby ozubení neprojeví v konečném výsledku na navýšení nákladů na nástroj.

Cílem této diplomové práce je navrhnout odvalovací frézu, rozpracovat nejdůležitější kroky její konstrukce a výroby pro konkrétní obráběný dílec, kterým je v tomto případě vložená hřídel přídatného převodu. Hlavní pozornost bude věnována výpočtům modifikovaného profilu a určení řezné geometrii nástroje, protože tyto parametry nejsou v literatuře dostatečně přesně specifikovány, přičemž jsou zcela určující pro kvalitu navrhovaného nástroje.

1 PŘÍDAVNÝ PŘEVOD A VLOŽENÁ HŘÍDEL

Účelem mechanického přídatného převodu je měnit převodový poměr mezi vstupním hnacím hřídelem a výstupním hnaným hřídelem. Přídatný převod navazuje na klasickou vícešupňovou převodovku. Toto uspořádání ve výsledku poskytuje zdvojnásobení počtu převodových stupňů klasické převodovky. Funkci přídatného převodu zobrazuje schéma (obr. 1.1).



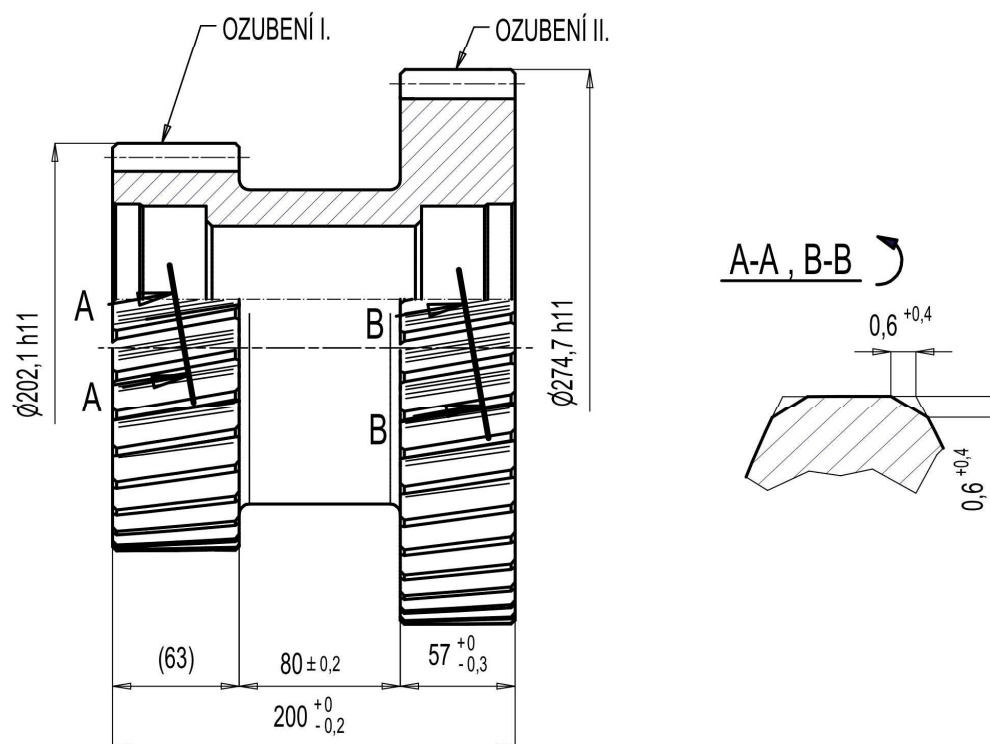
Obr. 1.1 Přídatný převod

Vnitřní ozubení hnací hřídele (1) umožňuje trvalé spojení mezi převodovkou a přídatným převodem. Jehlová ložiska, na kterých jsou uložena hnací ozubená kola (2, 3), jim umožňují volně se protáčet na rotující hnací hřídeli. Přesunutím spojovací objímky synchronizační

spojky (4) dojde k dočasnému spojení hnací hřídele s jedním z hnacích kol, které jsou ve stálém záběru s vloženou hřídelí (5). Rotačně volně uložená vložená hřídel je ve stálém záběru s ozubeným kolem (6), které je trvale spojeno s výstupní hnanou hřídelí (7).

1.1 Vložená hřídel

Navrhovaná odvalovací fréza je určena pro výrobu ozubení vložené hřídele přídavného převodu. Při přenosu krouticího momentu z ozubeného kola 3 na kolo 6 dle obrázku 1.1 plní hřídel 5 funkci vloženého kola. Vložené kolo se nepodílí na výsledném převodovém poměru mezi hnací a hnanou hřídelí, ale zaručuje, že směr otáček na vstupu i výstupu bude totožný. Při přenosu momentu mezi kolem 2 a 6 jde o složený převod a počty zubů ozubení vložené hřídele ovlivňují kromě výsledného směru otáčení také převodový poměr. Na obrázku 1.2 je zobrazen náčrt vložené hřídele, ve kterém jsou zakótovány nutné rozměry pro návrh odvalovací frézy a v detailním normálním řezu zubu jsou zakótovány sražené hrany zubů na hlavovém průměru.



Obr. 1.2 Vložená hřídel

Hodnoty evolventního ozubení vložené hřídele jsou uvedeny v tabulkách 1.1 a 1.2.

Tab. 1.1 Hodnoty ozubení I.

OZUBENÍ I.		
Modul	m	6
Počet zubů	z	31
Úhel záběru	α	20°
Úhel sklonu boční křivky zubu	β_0	- 10°
Smysl stoupání boční křivky zubu	-	LEVÝ
Jednotkové posunutí	x	0,104
Průměr roztečné kružnice	d	188,869
Průměr hlavové kružnice	d_a	202,1 h 11
Průměr patní kružnice	d_f	173,3 h 11
Výška hlavy zubu	h_a^*	1
Hlavová vůle	c^*	0,4
Rozměr přes zuby	W	65,143 -0,075; -0,13 / 4
Stupeň přesnosti podle ČSN 01 4682	-	6 ÷ 8 – Dd / III
Úhel protuberance	α_{prP0}	10°
Šířka protuberance	p_{rP0}	0,303
Přídavek na bok zubu	Δ_{sP0}	0,165 – 0,03
Zaoblení hlavy nástroje	ρ_{aP0}^*	0,4
SPOLUZABÍRAJÍCÍ KOLO		
Počet zubů	z	33
Jednotkové posunutí	x	0,0724
Průměr roztečné kružnice	d	201,054
Průměr hlavové kružnice	d_a	213,9 h 11
Průměr patní kružnice	d_f	185,1 h 11
Vzdálenost os	a_w	196 ± 0,035
Úhel os	Σ	0°

Tab. 1.2 Hodnoty ozubení II.

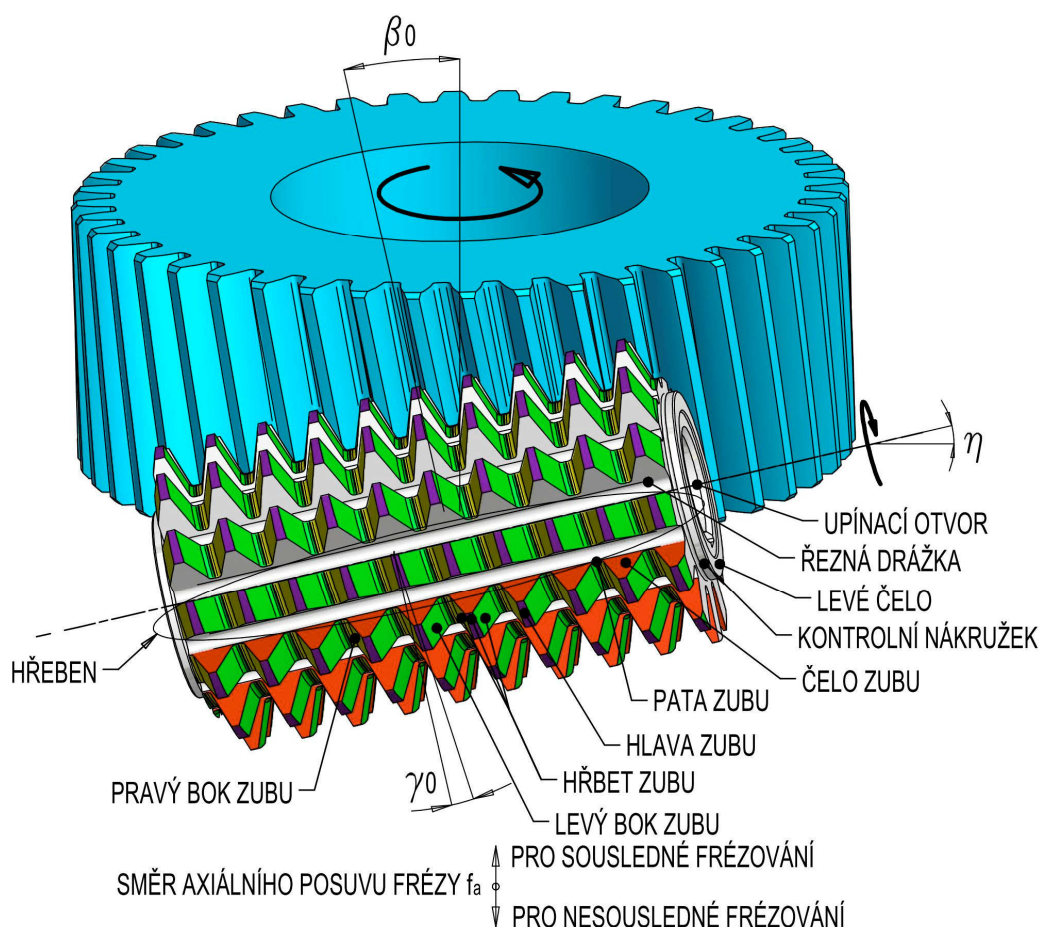
OZUBENÍ II.			
Modul	m	6	
Počet zubů	z	43	
Úhel záběru	α	20°	
Úhel sklonu boční křivky zubu	β_0	- 10°	
Smysl stoupání boční křivky zubu	-	LEVÝ	
Jednotkové posunutí	x	0,0634	
Průměr roztečné kružnice	d	261,98	
Průměr hlavové kružnice	d_a	274,7 h 11	
Průměr patní kružnice	d_f	245,9 h 11	
Výška hlavy zubu	h_a^*	1	
Hlavová vůle	c^*	0,4	
Rozměr přes zuby	W	101,455 -0,075; -0,13 / 6	
Stupeň přesnosti podle ČSN 01 4682	-	6 ÷ 8 – Dd / III	
Úhel protuberance	α_{prP0}	10°	
Šířka protuberance	p_{rP0}	0,303	
Přídavek na bok zubu	Δ_{sP0}	0,165 – 0,03	
Zaoblení hlavy nástroje	ρ_{aP0}^*	0,4	
SPOLUZABÍRAJÍCÍ KOLA		A	B
Počet zubů	z	21	37
Jednotkové posunutí	x	0,113	0,0711
Průměr roztečné kružnice	d	127,944	225,425
Průměr hlavové kružnice	d_a	141,2 h 11	238,2 h 11
Průměr patní kružnice	d_f	112,5	209,5 h 11
Vzdálenost os	a_w	196 ± 0,035	244,5 ± 0,035
Úhel os	Σ	0°	0°

Při výrobě hřídele je výchozím polotovarem tvarový výkovek z materiálu 14224. Před třískovým opracováním je provedeno žíhání a následné zušlechťení na dolní mez pevnosti, které přispívá k rozměrové stabilitě obrobku. Po třískovém opracování je provedeno chemicko - tepelné zpracování. Cementace s hloubkou cementační vrstvy 0,8 – 1 mm, následné kalení a popuštění. Tato kalená cementační vrstva o tvrdosti 58 – 60 HRC zaručuje odolnost proti tlaku a opotřebení. Zušlechťené jádro na 1000 – 1100 MPa odolává namáhání zubů na ohyb a tím minimalizuje možnost jejich vylomení při zátěži. Mezi dokončovací operace patří obrobení otvorů a boků zubů. Obroušení otvorů je provedeno ve dvou krocích. Průchozí otvor a otvor pro ložisko je obroušen v přípravku, ve kterém je hřídel upnuta přes vyhrubovaný profil zubů. Pro broušení druhého otvoru pro ložisko je použitý hydraulický upínací přípravek. Rozpínací pouzdro přípravku zaručuje dokonalé upnutí a také minimální úchylku házivosti. Pro tyto přednosti je obdobný přípravek využit také pro dohotovení ozubení. Konečný profil ozubení je ofrézován loupací odvalovací frézou. Při použití technologie tvrdého frézování, bez použití procesních kapalin, je dosaženo požadované kvality ozubení s minimálním dopadem na životní prostředí.

2 KONSTRUKCE ODVALOVACÍ FRÉZY

Vysoký výkon, kvalita obrobených ploch, dlouhá životnost a příznivá pořizovací cena patří mezi základní požadavky, které jsou kladeny na většinu nástrojů. Konstrukční řešení, které má těmto požadavkům vyhovět musí navíc v návrhu zohlednit mnoho dalších omezujících faktorů. Omezení vyplývající z obrobku v mnoha případech vymezuje například hranice průměru nástroje nebo volbu řezného materiálu. Způsob obrábění, tuhost obráběcího stroje a způsob upnutí nástroje jsou jen některé faktory, které dále zužují prostor pro optimální řešení. Vhodné konstrukční řešení musí respektovat efektivní zhotovitelnost nástroje a technologické požadavky výrobce vyplývající z dostupných technologií.

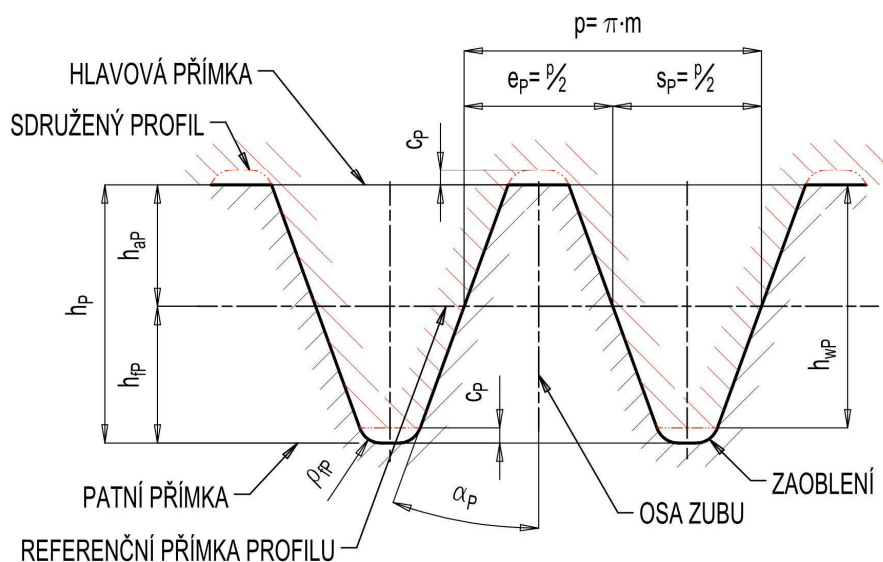
Obrázek 2.1 znázorňuje odvalovací frézu a vyhrubované levé obráběné ozubené kolo. Tento obrázek je doplněn základním označením jednotlivých částí frézy a směru axiálního posuvu f_a . Směr axiálního posuvu určuje druh frézování a tím i rozdílný průběh vytváření třísky. Rychlost axiálního posuvu vyjádřená v mm na jednu otáčku obrobku má podstatný vliv na průběh celého odvalovacího frézování.



Obr. 2.1 Odvalovací fréza

2.1 Základní profil a evolventní šnek

Profily boků zubů čelního ozubeného kola s přímými zuby jsou v rovině kolmé k ose kola tvořeny částí evolventy. Tvar evolventy závisí mimo jiné na počtu zubů kola. S rostoucím počtem zubů se zakřivení evolventy postupně zmenšuje. Profil zubů kola, které má nekonečný počet zubů odpovídá základnímu profilu zobrazeném na obrázku 2.2 [3]. V základním profilu evolventního ozubení jsou boky zubů tvořeny přímkami. Hodnoty v základním profilu jsou vyjádřeny pomocí modulu a označeny indexem P. Referenční přímka protíná základní profil tak, že šířka zubu a šířka zubové drážky je rovna polovině rozteče. Z důvodu zabránění kolize mezi hlavou a patou sdružených kol je výška paty větší o radiální vůli c_P než výška hlavy. Úhel profilu α_P je totožný s úhlem záběru α odpovídajícího ozubení.

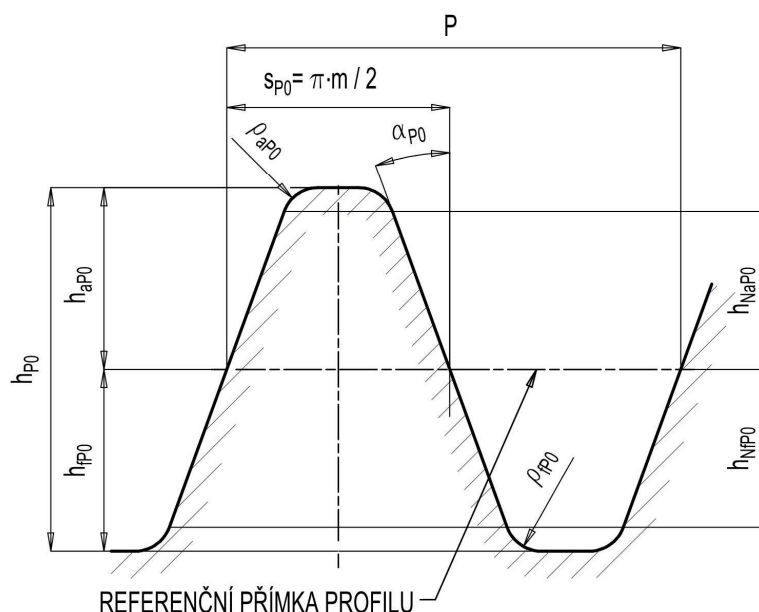


Obr. 2.2 Základní profil ozubení čelního soukolí [3]

Určení základního profilu odvalovací frézy vychází z principu obrábění tímto nástrojem. Obrábění odvalovací frézou si lze představit jako soukolí bez vůle, ve kterém je jedno kolo nahrazeno nástrojem s malým počtem zubů. Takto vymezené soukolí má sdružený základní profil, který odpovídá profilu čelního ozubeného kola. Tento záměr splňuje při výrobě evolventního ozubení nástroj, jehož břity leží na bočních plochách evolventního šneku.

Základní profil odvalovací frézy podle obrázku 2.3 [3] a ozubeného kola se shoduje v rozteči, úhlu záběru a tloušťce zubu na referenční přímce. Výška hlavy profilu frézy odpovídá výšce paty na profilu ozubení. Jedna odvalovací fréza tak může být použita pro výrobu korigovaného, nekorigovaného, přímého nebo šikmého ozubení s libovolným počtem zubů a úhlem sklonu. Obdobné zásady s jistým omezením platí i pro modifikované profily

ozubení, které ve většině případů nejsou normalizovány. Standardizované základní profily odvalovacích fréz upravují mimo jiné normy DIN 3972 a DIN 58412. Přestože výpočet profilu zubu odvalovací frézy vychází ze základního profilu odvalovací frézy, nesmí se tyto rozdílné profily zaměnit.



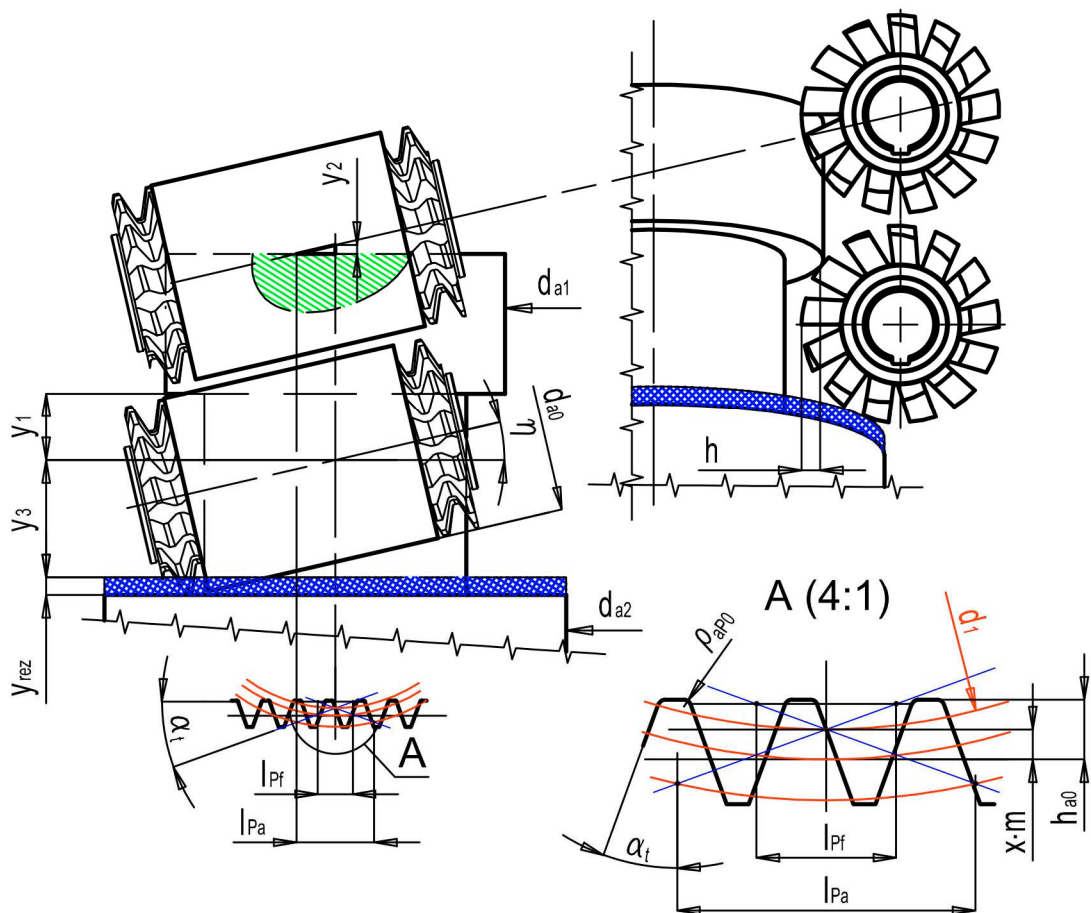
Obr. 2.3 Základní profil odvalovací frézy [3]

Základním tělesem pro návrh odvalovací frézy je evolventní šnek. Evolventní šnek je čelní šikmozubé evolventní ozubené kolo s velkým úhlem sklonu zubů β_o . Počet chodů šneku se rovná počtu zubů kola. Evolventní šroubovou plochu šneku vytvoří přímka T_E při svém šroubovém pohybu po šroubovici na základním válci šneku (obr. 2.4). Přímka T_E svírá s rovinou kolmou k ose šneku úhel γ_g , který je totožný s úhlem šroubovice, a současně je přímka tečná k základnímu válci o průměru d_g . V příčné rovině jednochodého šneku tak vzniknou dvě evolventy od tvořících přímek T_E pro pravou a levou stranu profilu. Na obrázku 2.4 je zobrazen jednochodý korigovaný evolventní šnek, doplněný znázorněnou návazností na základní profil. Pozitivní korekce $x \cdot m$ se navrhuje s ohledem na změnu průměru, tak aby na konci životnosti frézy byla korekce číselně shodná, ale negativní. Ke změně průměru dochází vlivem přestřování nástroje po otupení.

Vnější průměr frézy má rozhodující vliv na ostatní parametry navrhovaného nástroje. S rostoucím průměrem frézy se snižuje úhel stoupání závitu frézy a zvyšuje se maximální počet možných hřebenů. Zvětšení průměru frézy se pozitivně projeví na kvalitě obrobených ploch a také na životnosti nástroje. Z hlediska zvyšování řezných parametrů jsou vhodnější frézy menších průměrů. Menší průměr umožňuje v porovnání s větším volit vyšší otáčky frézy při zachování shodné řezné rychlosti. Zvýšením otáček frézy dochází k úměrnému zvýšení rychlosti rotace obrobku a axiálního posuvu frézy. Pro návrh univerzálního nástroje je vhodné volit průměr frézy tak, aby se značně neodlišoval od doporučených hodnot uvedených například v normě DIN 8002.

Nutnost určitého technologického prostoru pro nájezd a výjezd, vyplývajícího ze způsobu odvalovacího frézování, podmiňuje při návrhu nástroje zohlednit tvar a rozměry konkrétního obrobku. Nájezd a výjezd odvalovací frézy bývá prodloužen nutným natočením frézy η . Velikost natočení je závislá na sklonu zubů obráběného kola β_o , úhlu stoupání závitu frézy γ_o a kombinaci smyslu stoupání kola a frézy. Při shodném smyslu stoupání je výsledný úhel natočení roven rozdílu úhlů kola a frézy, při rozdílném smyslu stoupání pak součtu úhlů kola a frézy. U přímého ozubení je natočení rovno úhlu stoupání závitu frézy. Kombinací smyslů stoupání se sousledným nebo nesousledným frézováním mohou vzniknout čtyři rozdílné průběhy obrábění. Jednotlivé kombinace se mezi sebou odlišují například rozdílným průběhem utváření třísky, velikostí jednotlivých složek řezné síly, počtem aktivních řezných zubů a změnou pracovního úhlu hřbetu frézy. Smysl stoupání závitu frézy bývá, s ohledem na uvedené faktory, volen shodný se smyslem obráběného ozubení, u fréz univerzálních přednostně pravý. Rozhodnutí o smyslu stoupání závitu frézy a způsobu frézování následně podmiňuje provedení kontroly vnějšího průměru navrhované frézy na případné nepřípustné kolize s obrobkem.

Obrázek 2.5 znázorňuje dvě možnosti radiálního nájezdu nebo výjezdu a minimálního prostoru pro frézu v případě, je-li prostor omezen. Radiální nájezd pod nebo nad obrobek bez kontaktu s obrobkem vyžaduje větší axiální vzdálenost y_1 než nájezd pracovním posuvem do obrobku. Axiální vzdálenost y_2 při nájezdu se zafrézováním je rovna vzdálenosti pro výjezd frézy. Velikost minimálního prostoru pro nájezd nebo výjezd je určena součtem vzdáleností y_1 nebo y_2 a vzdáleností y_3 .



Obr. 2.5 Nájezd a výjezd odvalovací frézy

Stanovení vzdáleností y_1 , y_2 a y_3 pro zvolený průměr odvalovací frézy d_{a0} předchází určení doplňujících hodnot pro ozubení a odvalovací frézu. Čelní úhel záběru na roztečném válci ozubení upravuje vztah (2.1) [1].

$$\alpha_t = \arctg \frac{\tg \alpha}{\cos \beta_0} \text{ [rad]} \quad (2.1)$$

Stanovení průměrů základního (d_b) a roztečného (d) válce ozubení upravují vztahy (2.2) a (2.3) [1].

$$d_b = \frac{m \cdot z \cdot \cos \alpha_t}{\cos \beta_0} \text{ [mm]} \quad (2.2)$$

$$d = \frac{m \cdot z}{\cos \beta_0} \text{ [mm]} \quad (2.3)$$

Úhel záběru na hlavové kružnici ozubení α_{ta} upravuje vztah (2.4) [4].

$$\alpha_{ta} = \arccos \frac{d_b}{d_a} \text{ [rad]} \quad (2.4)$$

Úhel stoupání závitu γ_0 na roztečném válci nekorigované frézy upravuje vztah (2.5) [6].

$$\gamma_0 = \arcsin \frac{m \cdot z_0}{d_{a0} - 2 \cdot h_{a0}} \text{ [rad], } [^\circ] \quad (2.5)$$

Výpočet vzdáleností y_1 a y_3 upravují vztahy (2.6) a (2.7), které vychází z tečného kontaktu dvou mimoběžných válců. Hledané hodnoty y_1 a y_3 odpovídají maximu funkce při změně proměnné x . Tyto hodnoty lze stanovit pomocí vhodné numerické metody. Alternativní metoda určení y_1 a y_3 zahrnuje kontrolu kolize frézy a obrobku grafickou metodou.

$$y_1 = x \cdot \operatorname{tg} \eta + \frac{\sqrt{\left(\frac{d_{a0}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{a0}}{2} - h + \frac{d_{a1}}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_{a1}}{2}\right)^2 - x^2}\right)^2}}{\cos \eta} \text{ [mm]} \quad \cos \eta \neq 0 \quad (2.6)$$

$$y_3 = x \cdot \operatorname{tg} \eta + \frac{\sqrt{\left(\frac{d_{a0}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{a0} + d_{f1}}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_{a2}}{2}\right)^2 - x^2}\right)^2}}{\cos \eta} \text{ [mm]} \quad \cos \eta \neq 0 \quad (2.7)$$

Vzdálenost y_2 upravuje vztah (2.10) [3], který vychází z úhlu natočení frézy a šířky pole I_{Pa} nebo I_{Pf} , ve kterém se utváří aktivní profil zubu. Pole utváření profilu zubů je definováno v čelní rovině ozubeného kola. Šířku polí I_{Pa} , I_{Pf} upravují vztahy (2.8) a (2.9) [3], do vztahu (2.10) se dosazuje vyšší číselná hodnota z těchto vztahů.

$$I_{Pa} = \frac{2 \cdot [h_{a0} - x \cdot m - \rho_{a0} \cdot (1 - \sin \alpha)]}{\operatorname{tg} \alpha_t} \text{ [mm]} \quad (2.8)$$

$$I_{Pf} = \frac{d_{a1} \cdot \cos(\alpha_{ta} - \alpha_t) - d_1}{\operatorname{tg} \alpha_t} \text{ [mm]} \quad (2.9)$$

$$y_2 = tg \eta \cdot \frac{I_{Pa}}{2}, \text{ nebo } y_2 = tg \eta \cdot \frac{I_{Pf}}{2} \text{ [mm]} \quad (2.10)$$

Vypočtený minimální prostor pro frézu musí být menší než prostor na reálném obrobku, neboť nová fréza má zvětšený průměr důsledkem pozitivní korekce než uvádí výpočtové vztahy. Rozdílné výškové upnutí a úchylky na obrobku, seřízení a přesnost vypnutí stroje jsou dalšími faktory, které vyžadují určitou rezervu y_{REZ} v axiálním směru.

Délka odvalovací frézy je složena ze dvou nákrůžků, určených pro kontrolu házení, a závitové části. Šířka nákrůžku je volena s ohledem na snadnou kontrolu upnuté frézy číselníkovým úchylkoměrem. Zvolená šířka nákrůžků v rozmezí 2,5 až 5 mm [6] je určena také s ohledem na velikost ostatních rozměrů frézy. Minimální délka řezné závitové části frézy je tvořena úsekem, ve kterém se utváří profil zubů, a úsekem hrubovacím. Úsek utváření profilu zubů odpovídá průmětu záběrové přímky odvalovací frézy s obrobkem do osy frézy. Délka hrubovacího úseku se odvíjí od tvaru průnikové křivky mezi obrobkem a frézou. Průniková křivka je závislá na hlavovém průměru ozubeného kola a frézy, úhlu natočení frézy, hloubce řezu a parametrech obrábění. Odvalovací fréza navržena s minimální délkou řezné části neumožňuje axiální krokování, které je nezbytné pro stejnoměrné opotřebení břitů. Fréza s minimální délkou by vykazovala značně rozdílné otupení jednotlivých břitů, které má nepříznivý vliv na její životnost. Z tohoto důvodu se délka frézy navrhuje delší než je minimální potřebná délka, doporučené hodnoty délky jsou uvedeny například v normě DIN 8002.

Konstrukční řešení upnutí odvalovací frézy na obráběcím stroji musí zaručit přenos kroutícího momentu při dodržení požadované hodnoty házení. Typ provedení upínání vychází z koncepce obráběcího stroje, tak aby mezi frézou a strojem nebylo nutné použít doplňující mezikusy, které snižují tuhost a přesnost upnutí. Průměry upínacích otvorů, kuželů, unášeců a drážek jsou normalizovány například dle DIN 138.

2.3 Stanovení počtu chodů a hřebenů odvalovací frézy

Řezné drážky vytvářející čelo jednotlivých zubů rozdělují povrch odvalovací frézy na sekce nazývané hřebeny. Průnikem hřebenů s evolventním šnekem vzniknou řezné hrany zubů frézy, které vytvářejí obálkovými řezy tvar boků zubů kola. Hustota obálkových řezů se významně podílí na kvalitě obráběného boku zubu a velikosti odchylek od evolventy. Pro vytvoření přijatelného profilu boku zubu je postačující počet hřebenů volený v rozmezí 8 až 10 [3]. Takto malý počet hřebenů však nedovoluje volit ekonomicky optimální parametry

obrábění. Zvýšení počtu hřebenů zvyšuje řeznou kapacitu odvalovací frézy a hustotu obálkových řezů, zmenší se však využitelná část zubu frézy. Jemnozubé odvalovací frézy s počtem hřebenů nad 30 [3] dosahují nejvyšších frézovacích výkonů, ale počet možných přestřžení klesne na jedno až tři. Výrobní a ekonomická hlediska upřednostňují polohrubozubé frézy s 12 až 30 [3] hřebeny, u kterých je možné provést dostatečný počet přestřžení. Volba počtu hřebenů úzce souvisí s počtem chodů frézy.

Snížení obráběcího času při zachování úrovně řezné rychlosti a průměru frézy lze realizovat zvýšením axiálního posuvu nebo použitím vícechodé frézy. Obráběcí čas t_h pro dráhu obrábění b upravuje vztah (2.11) [3].

$$t_h = \frac{z \cdot d_{a0} \cdot \pi \cdot b}{z_0 \cdot f_a \cdot v_c \cdot 1000} \text{ [min]} \quad (2.11)$$

Axiální posuv f_a a počet chodů frézy z_0 se v uvedeném vztahu nacházejí ve jmenovateli. Pro nejkratší čas obrábění musí být součin axiálního posuvu a počtu chodů frézy co největší. Zvyšování jejich hodnot je omezeno řadou podmínek. Mezi hlavní omezení patří velikost maximální odřezávané třísky, hloubka stopy od axiálního posuvu a odchylka obálkové sítě od evolventy.

V průběhu odvalovacího frézování neodebírají zuby frézy stejnou tloušťku třísky. Limitní pro proces frézování je tříska odřezávaná zubem, u kterého dosahuje tříska maximální tloušťku ($h_1 \max$). Vysoké hodnoty maximální tloušťky odřezávané třísky způsobují vysoké řezné síly a krátkou životnost nástroje. Maximální tloušťka odřezávané třísky $h_1 \max$ je důležitým kritériem při návrhu frézy, její stanovení upravuje vztah (2.12) [3].

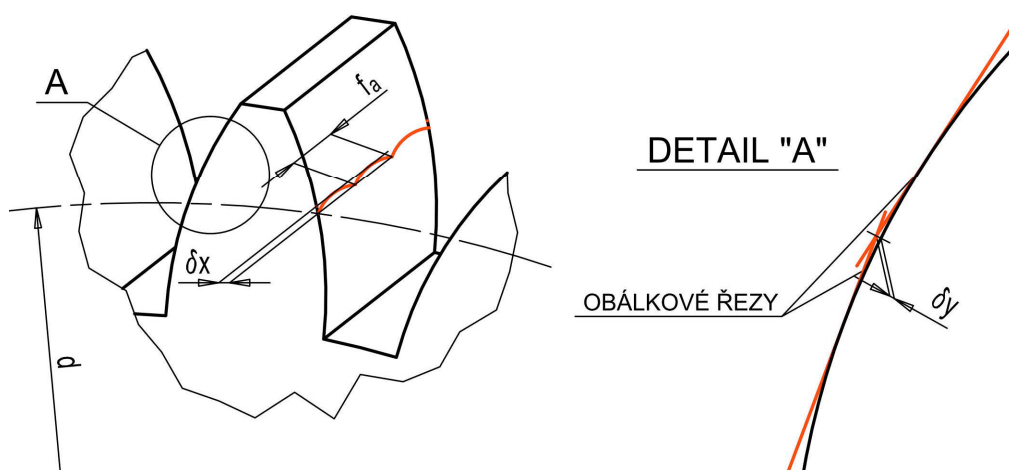
$$h_1 \max = 4,9 \cdot m \cdot z^{(0,00925 \cdot \beta_0 - 0,542)} \cdot e^{-0,015 \cdot \beta_0} \cdot e^{-0,015 \cdot x} \cdot \left(\frac{d_{a0}}{2 \cdot m} \right)^{(-0,00825 \cdot \beta_0 - 0,225)} \cdot \left(\frac{i_0}{z_0} \right)^{-0,877} \cdot \left(\frac{f_a}{m} \right)^{0,511} \cdot \left(\frac{h}{m} \right)^{0,319} \text{ [mm]} \quad (2.12)$$

Z hlediska zatížení a opotřebení nástroje se optimální hodnota tloušťky odřezávané třísky, pro většinu případů odvalovacího frézování, nachází v rozmezí 0,2 až 0,25 mm [3]. Zvětšením modulu, axiálního posuvu, hloubky řezu nebo počtu chodů frézy dochází ke zvýšení tloušťky odřezávané třísky. Ke snížení tloušťky třísky dochází při zvýšení počtu zubů obráběného kola, sklonu zubů, jednotkového posunutí profilu, průměru frézy a počtu hřebenů.

Nejvýrazněji je tloušťka třísky ovlivněna axiálním posuvem, počtem hřebenů a chodů frézy. Zdvojnásobení velikosti axiálního posuvu vyvolá nárůst maximální tloušťky

odřezávané třísky přibližně o 43%. Výraznější nárůst maximální tloušťky třísky přibližně o 83% se projeví při zdvojnásobení počtu chodů frézy. Zvýšením počtu hřebenů frézy se obráběný objem rozdělí na větší počet řezných zubů a výsledná tloušťka třísky bude tenčí. Zdvojnásobením počtu hřebenů klesne tloušťka třísky přibližně o 45%, pokles se také projeví na velikosti tlaku působícího na řezné hrany, který je jednou z příčin vyvolávající opotřebení nástroje.

Zkrácení obráběcího času zvýšením axiálního posuvu se u odvalovacího frézování projeví typickou stopou na obráběném ozubeném kole. Na obrázku 2.6 je znázorněna hloubka stopy od axiálního posuvu δ_x a odchylka obáلكové sítě od evolventy δ_y .



Obr. 2.6 Hloubka stopy od axiálního posuvu frézy a odchylka obáلكové sítě od evolventy

Přijatelná hodnota hloubky stopy od axiálního posuvu závisí na požadované přesnosti ozubení a na velikosti přídavku v případě, že se ozubené kolo jen hrubuje pro následné finální obrábění. Stanovení hloubky stopy od axiálního posuvu δ_x upravuje vztah (2.13) [3].

$$\delta_x = \left(\frac{f_a}{\cos \beta_0} \right)^2 \cdot \frac{\sin \alpha}{4 \cdot d_{a0}} \text{ [mm]} \quad (2.13)$$

Zvýšením axiálního posuvu f_a , zvětšením záběrového úhlu nebo zvětšením sklonu zubů kola se stopa prohlubuje. Závislost hloubky stopy δ_x na axiálním posuvu je kvadratická, zdvojnásobení posuvu se projeví čtyřnásobnou hloubku stopy. Zdvojnásobením průměru frézy se hloubka stopy zmenší na polovinu. Hloubka stopy není závislá na počtu chodů frézy.

Posouzení použitelnosti vícechodé odvalovací frézy je podmíněno určením odchylny obáلكové sítě od evolventy. Navýšením počtu chodů frézy přesnost obrobení bobů zubů klesá vlivem menší hustoty obáلكové sítě. Stanovení odchylny obáلكové sítě od evolventy δ_y upravuje vztah (2.14) [3].

$$\delta_y = \frac{\pi^2 \cdot z_0^2 \cdot m \cdot \sin \alpha}{4 \cdot z \cdot i_0^2} \text{ [mm]} \quad (2.14)$$

Zvýšením počtu chodů, modulu nebo úhlu záběru odchylna obáلكové sítě δ_y roste. Kvadratická závislost odchylny na počtu chodů frézy se při zdvojnásobení chodů projeví čtyřnásobnou odchylkou obáلكové sítě. S rostoucím počtem hřebenů frézy nebo zvyšujícím se počtem zubů obráběného kola hustota obáلكové sítě roste a velikost odchylny klesá. Zdvojnásobením počtu hřebenů klesne odchylna obáلكové sítě na čtvrtinu. Silná závislost odchylny na počtu chodů a počtu hřebenů umožňuje jejich vhodnou kombinací dosáhnout přijatelné kvality obrobení boku zubů. Se snižujícím se počtem zubů obráběného kola roste úhel otočení kola připadající na jeden obáلكový řez. Ozubená kola s malým počtem zubů vykazují vyšší hodnoty odchylny obáلكové sítě, které nelze korigovat axiálním posuvem frézy, neboť odchylna obáلكové sítě není závislá na axiálním posuvu.

Výkon odvalovacího frézování roste při zvýšení součinu axiálního posuvu a počtu chodů frézy. Maximální tloušťka odřezávané třísky se zvýšením axiálního posuvu zvyšuje méně než při zvýšení počtu chodů frézy, za předpokladu shodného navýšení součinu chodů a posuvu. Z tohoto pohledu je vhodné s ohledem na přípustnou hloubku posuvové stopy volit axiální posuv co největší a počet chodů co nejmenší pro zvolenou tloušťku maximální třísky. Periodické umístění obáلكových řezů u odvalovacího frézování nemá vliv na odchylku čelní rozteče ozubení při použití jednochodé frézy. Případná odchylna rozteče závitů frézy se projeví pouze na odchylce profilu obráběného boku zubů, neboť stejný zub frézy obrábí u všech zubů obrobku vždy totožnou část profilu. Naproti tomu vícechodá odvalovací fréza má vliv na velikost čelní odchylny rozteče ozubení, pokud počet zubů je celočíselně dělitelný počtem chodů frézy. V tomto případě je profil příslušných zubů obroben pouze zuby jednoho chodu frézy a případné odchylky rozteče závitů frézy se přenesou na obráběné kolo. Podmínku neceločíselného podílu je také výhodné splnit mezi počtem hřebenů a počtem chodů frézy. Při splnění této podmínky nastane posun jednotlivých obáلكových řezů v následných stopách od axiálního posuvu. Překrytím obáلكových řezů získají boky obrobených zubů šachovnicový vzhled povrchové struktury.

2.4 Stanovení výrobních rozměrů nemodifikované dokončovací odvalovací frézy

Výpočet výrobních rozměrů dokončovací odvalovací frézy vychází ze základního profilu frézy a zvolených hodnot vnějšího průměru, počtu hřebenů a chodů frézy. Výpočtové vztahy pro dokončovací frézu lze ve většině případů využít i pro frézy s nenormalizovaným profilem, vzhledem k jejich univerzální platnosti.

Roztečný průměr frézy d_0 patří mezi základní rozměry, od kterého se následně odvozují další hodnoty frézy. Je-li znám úhel stoupání závitu γ_0 , pak se hodnota roztečného průměru vypočte podle vztahu (2.15) [6], přičemž velikost úhlu γ_0 je upravena vztahem (2.5). Některé návrhy fréz vycházejí z roztečného průměru jako výchozí hodnoty a úhel γ_0 je v tomto případě následně vypočten dle uvedeného vztahu.

$$d_0 = \frac{z_0 \cdot m}{\sin \gamma_0} \text{ [mm]} \quad (2.15)$$

Rozteč frézy t_{n0} definovaná v normální rovině se shoduje s roztečí p obráběného ozubení, její výpočet upravuje vztah (2.16) [6].

$$t_{n0} = \pi \cdot m \text{ [mm]} \quad (2.16)$$

Stanovení osové rozteče frézy t_a se provede podle vztahu (2.17) [6].

$$t_a = \frac{t_{n0}}{\cos \gamma_0} \text{ [mm]} \quad (2.17)$$

Osové stoupání závitu frézy H je, kromě použití v dalších výpočtech, důležitou hodnotou pro nastavení stoupání stroje při broušení profilu. Kalením frézy se osové stoupání frézy, nastavené na stroji při podsoustružování, prodlužuje. Z důvodu eliminace chyby v důsledku prodloužení se osové stoupání před tepelným zpracováním vyrábí menší. Hodnotu zkráceného stoupání lze získat součinem osového stoupání H a koeficientu určeného zkouškou pro příslušný rezný materiál při kalení. Výpočet osového stoupání závitu frézy upravuje vztah (2.18) [7].

$$H = t_a \cdot z_0 \text{ [mm]} \quad (2.18)$$

Výpočet osového modulu m_{a0} a čelního modulu frézy m_{t0} upravují vztahy (2.19) a (2.20) [7].

$$m_{a0} = \frac{m}{\cos \gamma_0} [mm] \quad (2.19)$$

$$m_{t0} = \frac{m}{\sin \gamma_0} [mm] \quad (2.20)$$

Čelní úhel záběru frézy na roztečném válci α_{t0} se vypočte podle (2.21) [7].

$$\alpha_{t0} = \arctg \frac{tg \alpha}{\sin \gamma_0} [rad] \quad (2.21)$$

Výpočet úhlu stoupání šroubovice na základním válci γ_g upravuje vztah (2.22) [7].

$$\gamma_g = \arctg \frac{tg \gamma_0}{\cos \alpha_{t0}} [rad] \quad (2.22)$$

Poloměr základního válce evolventního šneku r_g definuje vztah (2.23) [7].

$$r_g = \frac{m_{a0} \cdot z_0}{2 \cdot tg \gamma_g} [mm] \quad (2.23)$$

Parametr šroubové plochy p_a je určen vztahem (2.24) [7] a představuje dráhu měřenou v ose šneku, kterou by myšlený bod šroubové plochy vykonal při otočení šneku o úhel jeden radián.

$$p_a = \frac{H}{2 \cdot \pi} [mm] \quad (2.24)$$

Výpočet čelního úhlu záběru evolventního šneku α_{tr} pro zvolený poloměr r_i upravuje vztah (2.25) [7]. Čelní úhel záběru se následně využije pro výpočet osového profilu evolventního šneku. Při stanovení osového profilu je nutné zvolit více poloměrů r_i . Zvolený poloměr r_i představuje v osovém řezu souřadnici y_i .

$$\alpha_{tr} = \arccos \frac{r_g}{r_i} [rad] \quad (2.25)$$

Výpočet evolventní funkce $ev\alpha$ se provede podle vztahu (2.26) [5]. V průběhu stanovení jednotlivých bodů evolventního profilu se do vztahu (2.26) dosazuje vždy příslušný úhel záběru α_{tr} .

$$ev\alpha = tg \alpha - \alpha [rad] \quad (2.26)$$

Souřadnice bodů x_i osového řezu evolventního šneku, které leží na pravé straně zubové mezery, se vypočtou ze vztahu (2.27) [7]. Hodnoty x_i pro levou stranu zubové mezery mají shodnou číselnou hodnotu pro příslušný poloměr s opačným znaménkem. Střed zubové mezery má v ose x hodnotu nula. Vztah platí pro evolventní šnek, který má shodnou šířku zubu a zubové mezery na roztečném válci.

$$x_i = p_a \cdot (ev\alpha_{tr} - ev\alpha_{i0}) + \frac{t_a}{4} \text{ [mm]} \quad (2.27)$$

Osový profil evolventního šneku je totožný s osovým profilem odvalovací frézy v případě, že řezné drážky jsou přímé. Frézy, které mají řezné drážky šroubové, mají osový profil odlišný, který se stanoví přepočtem z osového evolventního profilu šneku, výpočet osového profilu frézy je uveden v kapitole 2.5.

Řezné drážky odvalovací frézy vytvářejí prostor pro odřezávané třísky. Provedení řezných drážek ovlivňuje úhel čela zubů frézy. Přímé drážky jsou voleny u jednochodých fréz do úhlu 6° [3] stoupání závitu frézy, pro vícechodé frézy do úhlu $7,5^\circ$ [3]. U volby šroubovitých řezných drážek je jejich sklon opačný ke sklonu závitu frézy. Pro zachování obdobných řezných podmínek na obou bocích zubu jsou šroubové řezné drážky a závit frézy navzájem kolmé na roztečném průměru frézy. Hloubka řezné drážky závisí na výšce zubu a velikosti vačky. Profil drážky ovlivňuje pevnost zubů a počet možných přestřžení frézy. Šířka drážky musí být z technologického hlediska dostatečně velká pro výběh podtáčecího nože a brusného kotouče. Předběžný výpočet stoupání řezných drážek H_n upravuje vztah (2.28) [6].

$$H_n = \frac{\pi \cdot d_0}{tg \gamma_0} \text{ [mm]} \quad (2.28)$$

Vypočtená hodnota osového stoupání řezných drážek se zaokrouhlí na vyhovující hodnotu, která se volí s ohledem na stroje používané při výrobě a přestřhávání frézy. Zaokrouhlená hodnota stoupání drážek H_n se stává vstupní hodnotou pro další výpočty. Hodnota je neměnná po celou dobu životnosti frézy a je číselně vyznačena na nástroji. Stanovení úhlu sklonu řezných drážek β_{H0} na roztečném válci upravuje vztah (2.29) [6].

$$\beta_{H0} = arctg \frac{\pi \cdot d_0}{H_n} \text{ [rad]} \quad (2.29)$$

2.5 Stanovení skoku vačky a geometrie břitu odvalovací frézy

Úhel hřbetu na hlavě a bocích zubu vzniká radiálním podsoustružením a následným podbroušením o hodnotu skoku vačky k . Hřbetní plochy zubu jsou šroubové plochy, které mají v příčném řezu tvar Archimédovy spirály, nebo tvar jen mírně odlišný od této spirály. Takto vytvořený tvar zubu zaručuje, že při přeastřování frézy zachovávají boční břity zubu frézy svůj tvar. Cyklický proces radiálního podsoustružení probíhá při konstantní rychlosti posuvu nože v radiálním směru k ose frézy, která koná rotační pohyb po šroubovici o stoupání H . Počet cyklů i_c na jednu otáčku frézy upravuje vztah (2.30), vztah platí pro frézu, která má rozdílný smysl stoupání závitu a řezných drážek.

$$i_c = \frac{i_0 \cdot \cos(\gamma_0 - \beta_{H0})}{\cos \gamma_0 \cdot \cos \beta_{H0}} [-] \quad (2.30)$$

Stanovení velikosti radiálního skoku vačky k vychází z velikosti voleného úhlu hřbetu na hlavovém průměru nekorigované frézy. Úhel hřbetu α'_H je volen v rozmezí 9–12° [6] s ohledem na velikost vzniklého úhlu hřbetu na bocích zubu a na výrobních možnostech podbrušování. Velikost skoku vačky k upravuje vztah (2.31).

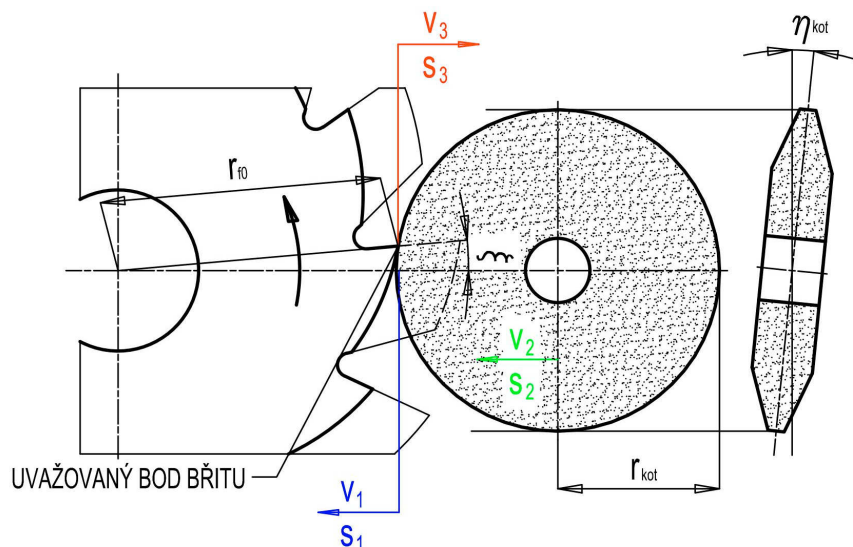
$$k = \frac{\pi \cdot d_{a0} \cdot \tan \alpha'_H}{i_c} [mm] \quad (2.31)$$

Velikost teoretického skoku vačky $k_{2\pi}$ za celou otáčku frézy upravuje vztah (2.32).

$$k_{2\pi} = k \cdot i_c [mm] \quad (2.32)$$

Vzniklý úhel hřbetu α_H na hlavě zubu je shodný s velikostí voleného úhlu α'_H v případě podsoustružení nožem, jehož řezné břity leží v rovině, která je určena vektorem radiálního posuvu nože a osou frézy. Při podbrušování hřbetní plochy kruhovým brusným kotoučem vzniká úhel hřbetu mírně odlišný od předpokládané hodnoty úhlu α'_H . Odchylku zapříčiňuje rozdílná poloha místa broušení břitu zubu frézy oproti podsoustružení. Situaci počátku broušení uvažovaného bodu břitu frézy znázorňuje obrázek 2.7. Fréza je na obrázku zachycena při broušení hřbetu na patním průměru, což je kritické místo z důvodu nebezpečí zbroušení následného zubu. Obrázek dále znázorňuje směr dráhy a rychlosti uvažovaného bodu břitu frézy a brusného kotouče v závislosti na úhlu otočení frézy. Obdobné podmínky broušení platí pro celý profil zubu. Následující vztahy platí pro nekorigovanou frézu s jmenovitým profilem na čele nástroje. Hodnoty vypočtené na základě následujících vztahů

jsou platné i po zavedení korekce, ale vztahy nelze bez úpravy průměrů frézy zpětně použít, neboť korekcí dojde k posunutí profilu zubů frézy vůči roztečnému válci.



Obr. 2.7 Počátek broušení břitu frézy

Brusný kotouč je při broušení natočen, tak aby v závěru podbrušování nezasahoval do bočního břitu následujícího zubu. Natočením kotouče o úhel stoupání závitu frézy na patním průměru se minimalizuje odchylka od průniku se šroubovou drahou následujícího zubu. Velikost úhlu natočení η_{kot} upravuje vztah (2.33).

$$\eta_{kot} = \arctg \frac{H}{\pi \cdot d_{f0}} \text{ [rad]} \quad (2.33)$$

Podmínkou pro výpočet přesného úhlu hřbetu libovolného bodu břitu v radiálním směru je stanovení úhlu počátku broušení ξ . Úhel počátku broušení pro patní průměr frézy se následně uplatní při stanovení úhlu obroušení profilu frézy. V uvedených vztazích lze pro získání úhlu počátku broušení uvažovaného bodu ostří frézy nahradit poloměr paty frézy r_{f0} příslušnými poloměry frézy a brusného kotouče. Stanovení promítnuté dráhy s_1 uvažovaného bodu frézy do vodorovné osy v závislosti na úhlu pootočení frézy ξ upravuje vztah (2.34). V tomto případě se jedná o bod frézy o poloměru r_{f0} . Situace je znázorněna na obrázku 2.7.

$$s_1 = r_{f0} - r_{f0} \cdot \cos \xi \text{ [mm]} \quad (2.34)$$

Dráha s_2 je určena posunem brusného kotouče vlivem vačky a je vypočtena ze vztahu (2.35).

$$s_2 = \xi \cdot \frac{k_{2\pi}}{2 \cdot \pi} [mm] \quad (2.35)$$

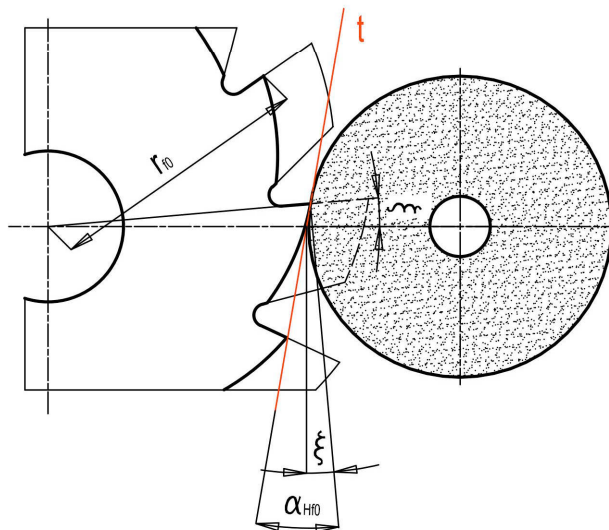
Dráhu s_3 představuje promítnutý pohyb myšleného bodu brusného kotouče do vodorovné osy. Myšlený bod se pohybuje po eliptické dráze vzniklé natočením brusného kotouče v závislosti na úhlu otočení frézy. Výpočet dráhy s_3 se provede podle vztahu (2.36).

$$s_3 = r_{kot} - \sqrt{r_{kot}^2 - \frac{r_{f0}^2 \cdot \sin^2 \xi}{\cos^2 \eta_{kot}}} [mm] \quad (2.36)$$

Derivací drah s_1 , s_2 a s_3 stanovíme okamžité rychlosti v_1 , v_2 a v_3 . Hledaný úhel počátku broušení ξ musí splnit podmínku, že součet rychlostí s ohledem na jejich směr je roven nule. V místě definovaném úhlem počátku broušení dojde jen k teoretickému kontaktu myšleného bodu frézy s brusným kotoučem. Při menším nebo větším úhlu je myšlený bod frézy mimo kolizní dráhu brusného kotouče. Úhel ξ definuje vztah (2.37), který lze řešit vhodnou numerickou metodou.

$$\frac{r_{f0}^2 \cdot \sin \xi \cdot \cos \xi}{\cos^2 \eta_{kot} \cdot \sqrt{r_{kot}^2 - \frac{r_{f0}^2 \cdot \sin^2 \xi}{\cos^2 \eta_{kot}}}} - \frac{k_{2\pi}}{2 \cdot \pi} + r_{f0} \cdot \sin \xi = 0 \quad (2.37)$$

Vznik úhlu hřbetu při podbrušování frézy znázorňuje obrázek 2.8. Fréza je v návaznosti na předchozí vztahy zachycena na obrázku při podbrušování paty zubu. Princip tvorby hřbetu zubu frézy je totožný pro celý profil zubu.

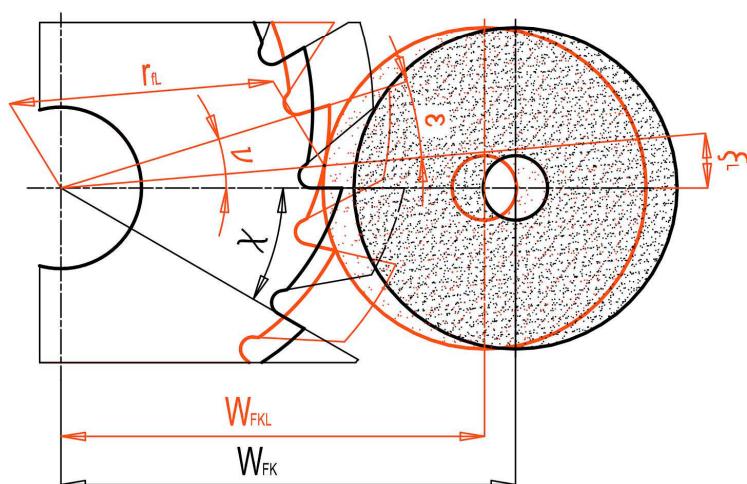


Obr. 2.8 Vznik úhlu hřbetu při podbrušování

Výpočet úhlu hřbetu zubu frézy je určen směrnici tečny k elipse a úhlem počátku broušení pro příslušný poloměr frézy. Směrnice tečny se získá derivací funkce části elipsy v bodu počátku broušení. Výpočet úhlu hřbetu α_{Hf0} upravuje vztah (2.38). Pro stanovení úhlu hřbetu v libovolném bodu břitu se ve vztahu (2.38) nahradí úhel počátku broušení, poloměr brusného kotouče a patní poloměr frézy hodnotami vypočtenými ze vztahu (5.3) pro požadovaný poloměr frézy.

$$\alpha_{Hf0} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\cos^2 \eta_{kot} \cdot \sqrt{r_{kot}^2 - \frac{r_{f0}^2 \cdot \sin^2 \xi}{\cos^2 \eta_{kot}}}}{r_{f0} \cdot \sin \xi} + \xi \text{ [rad]} \quad (2.38)$$

Úhel podbroušení zubu frézy ε určuje využitelnost frézy v průběhu přeastřování. S rostoucím počtem hřebenů úhel přebroušení klesá, neboť poloměr brusného kotouče nelze zmenšit pod určitou velikost danou výškou zubu a upínací přírubou kotouče. Úhel podbroušení v patě frézy je nejmenší a tuto situaci znázorňuje obrázek 2.9.



Obr. 2.9 Úhel podbroušení zubu frézy

Úhel mezi hřbeny frézy χ se vypočte podle vzorce (2.39), který zohledňuje úhel sklonu řezných drážek a úhel stoupání závitu frézy.

$$\chi = \frac{2 \cdot \pi}{i_c} \text{ [rad]} \quad (2.39)$$

Výchozí vzdálenost W_{FK} mezi osami frézy a brusného kotouče upravuje vztah (2.40). Uvažovaný bod břitu leží při stanovení vzdálenosti W_{FK} v rovině definované osou frézy a středem brusného kotouče.

$$W_{FK} = r_{f0} \cdot \cos \xi + \sqrt{r_{kot}^2 - \frac{r_{f0}^2 \cdot \sin^2 \xi}{\cos^2 \eta_{kot}}} + \frac{k_{2\pi} \cdot \xi}{2 \cdot \pi} \quad [mm] \quad (2.40)$$

Úhel maximálního pootočení frézy v (obr. 2.9) stanovený z výchozí polohy myšleného bodu břitu frézy do kontaktu následujícího zubu s brusným kotoučem se vypočte podle vzorce (2.41). Výchozí poloha bodu břitu je definována shodně s polohou pro výpočet výchozí vzdálenosti. Výpočet úhlu pootočení frézy v se provádí numerickou metodou.

$$r_{f0} \cdot \cos(\chi - \nu) + \sqrt{r_{kot}^2 - \frac{r_{f0}^2 \cdot \sin^2(\chi - \nu)}{\cos^2 \eta_{kot}}} + \frac{k_{2\pi} \cdot \nu}{2 \cdot \pi} - W_{FK} = 0 \quad (2.41)$$

Stanovení limitní vzdálenosti mezi osami frézy a brusného kotouče W_{FKL} při úhlu maximálního pootočení frézy upravuje vztah (2.42).

$$W_{FKL} = r_{f0} \cdot \cos(\chi - \nu) + \sqrt{r_{kot}^2 - \frac{r_{f0}^2 \cdot \sin^2(\chi - \nu)}{\cos^2 \eta_{kot}}} \quad [mm] \quad (2.42)$$

Přibližné stanovení úhlu podbroušení zubu frézy ε se provede podle (2.43), tento vztah zanedbává rozdíl mezi koncovým úhlem broušení ξ_L a úhlem počátku broušení ξ . Rozdíl mezi úhly je relativně malý a záměna těchto úhlů způsobí jen malou odchylku od skutečné hodnoty.

$$\varepsilon \approx \nu - \xi \quad [rad] \quad (2.43)$$

Přesnou hodnotu úhlu podbroušení zubu frézy ε lze stanovit po numerickém řešení soustavy rovnic (2.44), (2.45) pro určení koncového úhlu broušení ξ_L a poloměru r_{fL} , který představuje poloměr frézy v koncovém bodě broušení.

$$r_{fL} \cdot \cos \xi_L + \sqrt{r_{kot}^2 - \frac{r_{fL}^2 \cdot \sin^2 \xi_L}{\cos^2 \eta_{kot}}} - W_{FKL} = 0 \quad (2.44)$$

$$\frac{r_{fL}^2 \cdot \sin \xi_L \cdot \cos \xi_L}{\cos^2 \eta_{kot} \cdot \sqrt{r_{kot}^2 - \frac{r_{fL}^2 \cdot \sin^2 \xi_L}{\cos^2 \eta_{kot}}}} - \frac{k_{2\pi}}{2 \cdot \pi} + r_{fL} \cdot \sin \xi_L = 0 \quad (2.45)$$

Přesnou hodnotu úhlu podbroušení zubu frézy ε určuje vztah (2.46).

$$\varepsilon = \nu - \xi_L \text{ [rad]} \quad (2.46)$$

Podbrušováním zubů frézy radiálním způsobem vzniká hřbet zubu mírně odlišný od tvaru Archimédovy spirály. Mírná tvarová odchylka hřbetu způsobená změnou polohy styčného bodu frézy a brusného kotouče nemá podstatný vliv na změnu profilu nástroje během jeho životnosti. Radiální zmenšování poloměru frézy při podbrušování neodpovídá velikosti skoku radiální vačky. Radiální vačka k nastavená na stroji vyvolá vlivem polohy broušení výraznější změnu poloměru frézy. Výpočet průměrného skoku teoretické vačky k_t , který přibližně odpovídá vzniklému radiálnímu zmenšování poloměru upravuje vztah (2.47). Dosazovaná hodnota úhlu hřbetu na roztečném průměru se stanoví podle vztahu (2.38). Velikost skoku vačky k_t je mírně proměnná při změně poloměru frézy a brusného kotouče. Při zanedbání proměnnosti lze vypočtenou hodnotu vačky využít pro stanovení úhlu hřbetu v libovolném bodu břitu nebo při stanovení osového profilu spirálové frézy. Při výrobě frézy se hodnota vačky využije při podsoustružení profilu.

$$k_t = \frac{d_0 \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \alpha_{Hd0}}{i_c} \text{ [mm]} \quad (2.47)$$

Nová fréza se zhotovuje s pozitivní korekcí. Velikost korekce souvisí s úhlem maximálního podbroušení zubů nebo s maximálním úhlem odostření hřebene frézy. Hlavní omezení u většiny fréz je úhel obroušení profilu, který je výrobně limitován. U odostření hřebene jde o pevnostní podmínku zůstatku zubu. Nová fréza se navrhuje tak, aby jmenovitý profil ležel v polovině podbroušeného zubu. Přeostřováním se průměr frézy zmenšuje a na konci životnosti se z původně pozitivně korigované frézy stane negativně korigovaná fréza. U takto navržené frézy se chyby vznikající při radiálním podbrušování minimalizují. Zvětšený průměr nové frézy, při zachování hodnoty úhlu podbroušení, poskytuje určitou rezervu při podbrušování profilu. Posunutí základního profilu frézy upravuje vztah (2.48).

$$x \cdot m = \frac{\varepsilon \cdot k_t}{2 \cdot \chi} \text{ [mm]} \quad (2.48)$$

Výpočet průměru hlavové kružnice nové frézy d'_a se provede podle vztahu (2.49).

$$d'_a = d_{a0} + 2 \cdot x \cdot m \text{ [mm]} \quad (2.49)$$

Profil zubu frézy ve většině případů nelze podbrousit v celé délce. Zadní část zubu, která nejde obrousit, se zhotoví podsoustružením před tepelným zpracováním frézy. Podsoustružení se provede podle odlehčovací vačky k_1 . Velikost zdvihu odlehčovací vačky upravuje vztah (2.50) [6].

$$k_1 = (1,5 \text{ až } 2) \text{ [mm]} \quad (2.50)$$

Normální úhel hřbetu na bocích zubů α_{Bn} musí dosahovat minimálně hodnoty 2–3° [6]. Velikost tohoto úhlu je ovlivněna technologickým úhlem hřbetu α_{Ht} definovaným ve směru závitů frézy. Technologický úhel hřbetu je nejmenší na hlavovém průměru frézy a je definován vztahem (2.51) [5]. Dosazovaný úhel α_H se určí podle vztahu (2.38).

$$\alpha_{Ht} = \arctg \left[\operatorname{tg} \alpha_H \cdot \cos \left(\arctg \frac{H}{\pi \cdot d_{a0}} \right) \right] \text{ [rad], } [^\circ] \quad (2.51)$$

Výpočet normálního úhlu hřbetu na boku zubu upravuje vztah (2.52) [5].

$$\alpha_{Bn} = \arctg (\operatorname{tg} \alpha_{Ht} \cdot \sin \alpha) \text{ [rad], } [^\circ] \quad (2.52)$$

Úhel čela γ_H dokončovacích odvalovacích fréz se volí nejčastěji 0°. Nulový úhel čela je volen pro minimální vliv na změnu profilu frézy v průběhu její životnosti. Hrubovací frézy mají většinou úhel čela rovněž nula stupňů, případně pozitivní do 8° [3].

Stanovení osového profilu odvalovací frézy vychází z osového profilu evolventního šneku. Osový profil frézy je totožný s profilem šneku v případě, že řezné drážky jsou provedeny rovnoběžně s osou frézy. Frézy se spirálovými řeznými drážkami mají osový profil odlišný od profilu šneku. Uvažované body břitu frézy, které leží současně na profilu evolventního šneku, jsou z osového řezu pootočený o úhel ι . Osový řez protíná zubovou mezeru v jejím středu, ve kterém má souřadnice x hodnotu nula. Stanovení úhlu pootočení ι upravuje vztah (2.53), kde znaménko + platí pro frézu s levochodým závitěm a znaménko – pro frézu s pravochoďým závitěm. Vztah je platný pro spirálovou frézu s nulovým úhlem čela γ_H .

$$\iota_i = \pm \frac{2 \cdot x_i \cdot \pi}{H + H_n} \text{ [rad]} \quad (2.53)$$

Výpočet souřadnice y_{ai} osového profilu frézy upravuje vztah (2.54), kde znaménko + platí pro frézu s levochodým závitěm a znaménko – pro frézu s pravochoďým závitěm. Vztah

je platný i pro frézu s přímými řeznými drážkami, která má úhel pootočení bodu rovný nule. Velikost souřadnice x_{ai} je totožná se souřadnicí x_i evolventního šneku (2.55).

$$y_{ai} = y_i \pm \frac{l_i \cdot k_t}{\chi} [mm] \quad (2.54)$$

$$x_{ai} = x_i [mm] \quad (2.55)$$

3 MODIFIKOVANÉ PROFILY ODVALOVACÍCH FRÉZ

Jednou z cest, jak zlepšit dynamické a záběrové poměry ozubených soukolí je modifikování zubů. Modifikace představuje úpravu tvaru zubů ozubeného kola. Úprava může být provedena na hlavě, nebo na patě, případně na hlavě i patě. Modifikované evolventní ozubení vyráběné odvalovacím způsobem vyžaduje frézu, která má modifikovaný základní profil. Modifikovaný profil odvalovací frézy vychází ze základního profilu. Modifikací profilu vznikne nástroj speciální, který je určen jen pro úzký rozsah obráběného ozubení. Tato odlišnost od nástrojů bez modifikace vyžaduje konstrukční řešení nástroje na konkrétní ozubené kolo.

3.1 Stanovení modifikovaného profilu odvalovací frézy pro srážení hran

Sražení hran na hlavách zubů je zvláštním případem modifikace pro vytvoření vstupní vřule. Tato modifikace se provádí pro odstranění hranového záběru, snížení hlučnosti a zamezení poškození hran při přepravě nebo montáži ozubení. Parametry ozubení a rozměry sražené hrany v normální rovině ozubení jsou vstupními údaji pro návrh profilu nástroje. Řešení modifikovaného profilu nástroje je provedeno v čelní rovině ozubeného kola a následně se hodnoty přepočítají do normální roviny ozubeného kola. Výsledkem řešení je stanovení polohy a sklonu srážecího břitu. V případě přímých zubů lze použít totožné vztahy.

Výpočet čelního modulu ozubeného kola m_t upravuje vztah (3.1) [1].

$$m_t = \frac{d}{z} \text{ [mm]} \quad (3.1)$$

Pro výpočet čelního úhlu záběru α_{ti} na daném poloměru se používá obecný vztah (3.2) [5].

$$\alpha_{ti} = \arccos \frac{d_b}{d_i} \text{ [rad]} \quad (3.2)$$

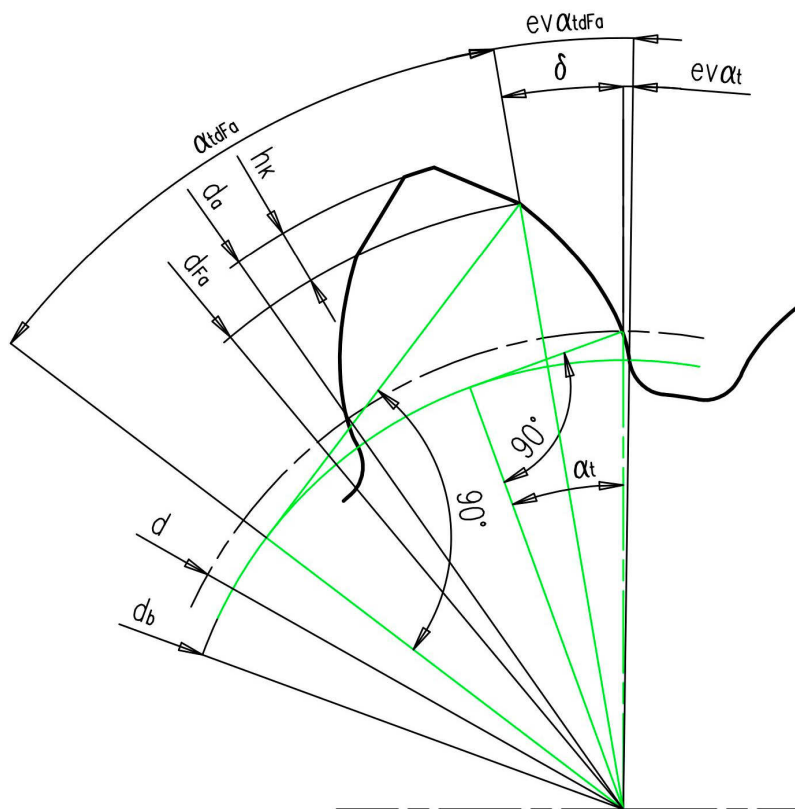
Výpočet průměru počátku sražení zubů d_{Fa} při požadované hodnotě výšky sražení zubů h_K se provede podle vzorce (3.3).

$$d_{Fa} = d_a - 2 \cdot h_K \text{ [mm]} \quad (3.3)$$

Obrázek 3.1 znázorňuje výchozí pozici pro stanovení úhlu δ , který vymezuje počátek modifikace. Rameno úhlu protíná koncový bod evolventy, který je zároveň počátečním

bodem sražení zubu. Úhel δ je stanoven od přímky protínající roztečnou kružnici v místě dotyku boku zubu a vypočte se ze vztahu (3.4).

$$\delta = \alpha_t - \alpha_{tdFa} - \operatorname{tg} \alpha_t + \operatorname{tg} \alpha_{tdFa} \quad [\text{rad}] \quad (3.4)$$



Obr. 3.1 Výchozí pozice pro výpočet

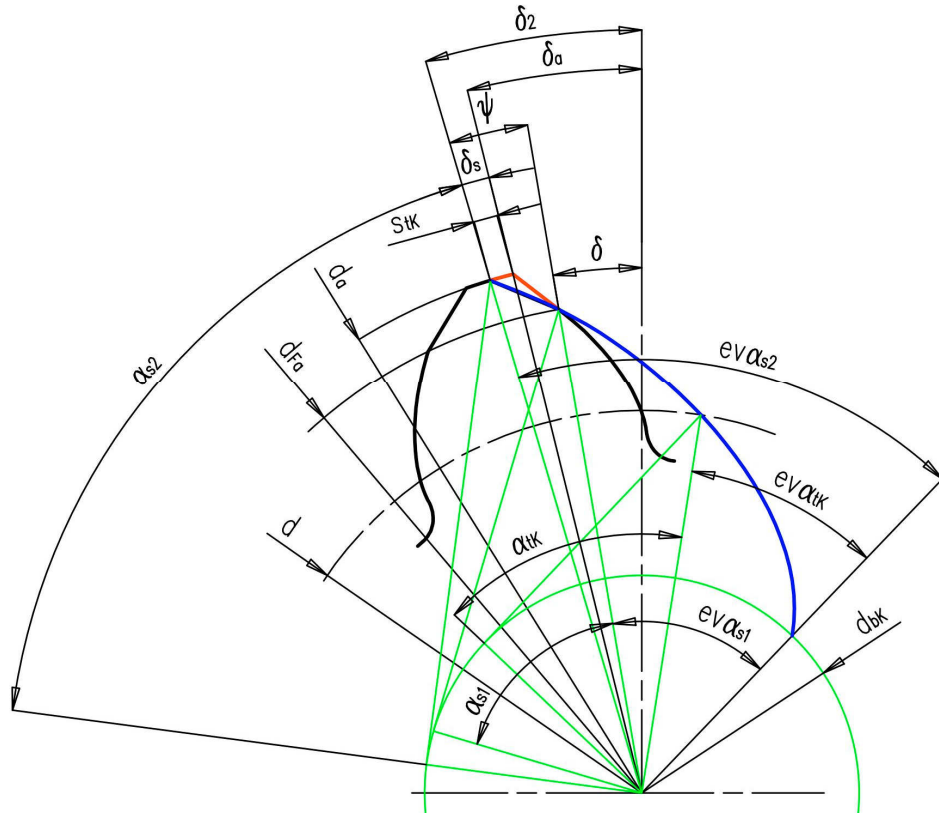
Sražení zubu není provedeno přímkou, ale částí evolventy, která vzniká od srážecího břitu odvalovací frézy. Postup výpočtu záběrového úhlu sražení α_{tK} je znázorněn na obr. 3.2.

Výpočet úhlu δ_a pro teoretický koncový bod evolventy na hlavové kružnici zubu upravuje vztah (3.5).

$$\delta_a = \alpha_t - \alpha_{ta} - \operatorname{tg} \alpha_t + \operatorname{tg} \alpha_{ta} \quad [\text{rad}] \quad (3.5)$$

Přepočet šířky sražení s_K z normální roviny do čelní roviny ozubeného kola se provede podle vztahu (3.6).

$$s_{tK} = \frac{s_K}{\cos \beta_0} \quad [\text{mm}] \quad (3.6)$$



Obr. 3.2 Evolventa sražení

Úhel δ_s vyjadřuje šířku sražení zubu a je určen vztahem (3.7).

$$\delta_s = 2 \cdot \arcsin \frac{s_{tk}}{d_a} \text{ [rad]} \quad (3.7)$$

Úhel δ_2 pro koncový bod sražení se stanoví podle vztahu (3.8).

$$\delta_2 = \delta_a + \delta_s \text{ [rad]} \quad (3.8)$$

Úhel ψ mezi koncem a počátkem sražení upravuje vztah (3.9).

$$\psi = \delta_2 - \delta \text{ [rad]} \quad (3.9)$$

Uvedené vztahy popisují počáteční a koncový body sražení, které protíná evolventa sražení. Dva body evolventy postačují na její určení a tím i na určení záběrového úhlu na roztečné kružnici. Základní rovnice (3.10) pro následný výpočet úhlu záběru α_{s1} je uvedena s odvozením.

$$\begin{aligned} ev\alpha_{s2} - ev\alpha_{s1} &= \psi \\ ev\alpha_{s2} &= \psi + ev\alpha_{s1} \\ tg\alpha_{s2} - \alpha_{s2} &= \psi + tg\alpha_{s1} - \alpha_{s1} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Mezikrokem k řešení rovnice (3.10) je postupné vyjádření α_{s2} . Odvození vychází ze vztahů (3.11) a (3.12).

$$\cos \alpha_{s1} = \frac{d_{bK}}{d_{Fa}} \quad (3.11)$$

$$\cos \alpha_{s2} = \frac{d_{bK}}{d_a} \quad (3.12)$$

Součet rovnic (3.11) a (3.12) s odstraněním d_{bK} znázorňuje rovnice (3.13).

$$d_{Fa} \cdot \cos \alpha_{s1} - d_a \cdot \cos \alpha_{s2} = 0 \quad (3.13)$$

Vyjádření α_{s2} upravuje vztah (3.14).

$$\alpha_{s2} = \arccos \frac{d_{Fa} \cdot \cos \alpha_{s1}}{d_a} \text{ [rad]} \quad (3.14)$$

Dosazením α_{s2} do rovnice (3.10) a převedením na jednu stranu se získá rovnice (3.15) pro výpočet α_{s1} . Řešení rovnice se provádí vhodnou numerickou metodou.

$$\psi + tg \alpha_{s1} - \alpha_{s1} - tg \left(\arccos \frac{d_{Fa} \cdot \cos \alpha_{s1}}{d_a} \right) + \arccos \frac{d_{Fa} \cdot \cos \alpha_{s1}}{d_a} = 0 \quad (3.15)$$

Průměr základní kružnice evolventy sražení se vypočte dle vztahu (3.16).

$$d_{bK} = \cos \alpha_{s1} \cdot d_{Fa} \text{ [mm]} \quad (3.16)$$

Výpočet úhlu záběru α_{tK} na roztečné kružnici upravuje vztah (3.17).

$$\alpha_{tK} = \arccos \frac{d_{bK}}{d} \text{ [rad]} \quad (3.17)$$

Obrázek 3.3 znázorňuje kontakt pootočeného bodu V s břitem srážení. Rychlost společného bodu V', který leží současně na kružnici d_{Fa} a břitu srážení je ve směru osy x shodná pro pomyslný pohyb po kružnici i pro pohyb po břitu. Bod V' vymezuje úhel kontaktu ω . Výpočet úhlu ω vychází z rovností derivací drah bodu V a břitu srážení.


$$s_{V1} = \frac{d_{Fa} \cdot \sin \omega}{2} [mm] \quad (3.18)$$
$$s_{V2} = \frac{m_t \cdot z \cdot \omega + d_{Fa} \cdot (1 - \cos \omega) \cdot \operatorname{tg} \alpha_{tK}}{2} \quad [mm] \quad (3.19)$$
$$d_{Fa} \cdot tg \alpha_{tK} \cdot \sin \omega + m_t \cdot z - d_{Fa} \cdot \cos \omega = 0 \quad (3.20)$$
$$\omega = \alpha_{s1} - \alpha_{sK} \text{ [rad]} \quad (3.21)$$

Výpočet souřadnice bodu P je založen na výpočtu průsečíku dvou přímek, které jsou určeny směrnice rovnicemi, obecný vztah rovnice přímky je uveden pod (3.22).

Střed soustavy souřadnic leží na roztečné kružnici, v nákrese je totožný s bodem výchozí polohy hlavního břitu. Výpočet vzdálenosti posunutí hlavního břitu ve směru osy x při otočení ozubeného kola o úhel $\delta + \omega$ upravuje vztah (3.23). Vypočtená souřadnice x_1 se využije pro výpočet konstanty první rovnice, souřadnice y_1 pro daný bod se rovná nule.

44

Do rovnice (3.22) se dosadí za φ_1 hodnota vypočtená dle vztahu (3.24) a vypočte se konstanta první rovnice (3.25).

$$\varphi_1 = \alpha_i + \frac{\pi}{2} \text{ [rad]} \quad (3.24)$$

$$q_1 = -x_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 \quad (3.25)$$

Pro rovnici břitu srážení se vychází ze souřadnic x_2 a y_2 bodu V' , které se vypočítají podle (3.26), (3.27).

$$x_2 = \frac{d_{Fa} \cdot \sin \omega}{2} \text{ [mm]} \quad (3.26)$$

$$y_2 = \frac{d_{Fa} \cdot \cos \omega - d}{2} \text{ [mm]} \quad (3.27)$$

Do rovnice (3.22) se dosadí za φ_2 hodnota vypočtená dle vztahu (3.28) a vypočte se konstanta q_2 druhé rovnice (3.29).

$$\varphi_2 = \alpha_{iK} + \frac{\pi}{2} \text{ [rad]} \quad (3.28)$$

$$q_2 = y_2 - x_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 \quad (3.29)$$

Ze soustavy dvou rovnic se určí souřadnice x , y bodu P , jako průsečíku přímek podle vztahů (3.30), (3.31).

$$x = \frac{q_2 - q_1}{\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2} \text{ [mm]} \quad (3.30)$$

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 + q_1 \text{ [mm]} \quad (3.31)$$

Souřadnice y představuje vzdálenost mezi přechodem břitu hlavního do břitu srážecího od referenční přímky profilu, a to v případě, že se jedná o základní profil dokončovací frézy. U odvalovací frézy se tato vzdálenost označuje h_{FPO} .

Přepočet čelního úhlu záběru srážecího břitu α_{iK} do normální roviny upravuje vztah (3.32). Výsledný úhel α_{KP0} odpovídá úhlu sražení v základním profilu odvalovací frézy.

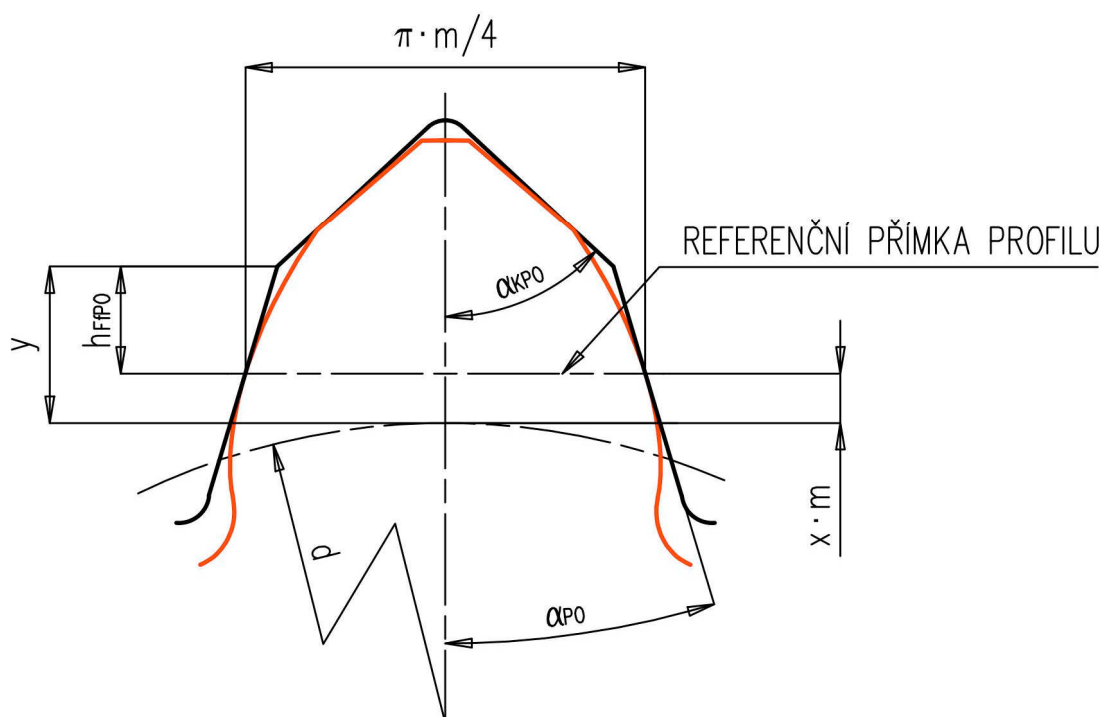
$$\alpha_{KP0} = \arctg(\operatorname{tg} \alpha_{iK} \cdot \cos \beta_0) \text{ [rad]} \quad (3.32)$$

3.2 Vliv doplňujících konstrukčních parametrů ozubení na hodnotu h_{FFP0}

Hodnotu h_{FFP0} ovlivňují konstrukční parametry obráběného ozubení. Vliv modulu, průměru hlavové kružnice, úhlu záběru, počtu zubů a sklonu při definované šířce a výšce sražení zohledňuje již základní výpočet. Výsledkem základního výpočtu je hodnota y a úhel α_{KP0} . Následující výpočty se vztahují k úpravám v základním profilu frézy.

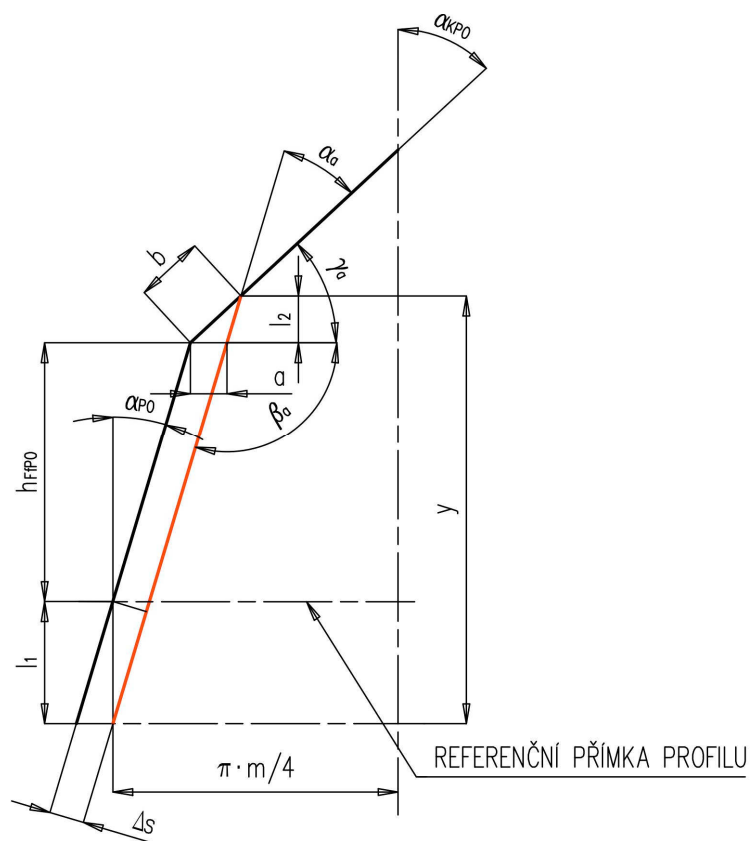
Vliv jednotkového posunutí základního profilu x na hodnotu h_{FFP0} (obr. 3.5) stanoví vztah (3.33).

$$h_{FFP0} = y - x \cdot m \quad [mm] \quad (3.33)$$



Obr. 3.5 Vliv posunutí základního profilu

Vliv přídatku na bok zubu Δ_s pro broušení nebo ševingování zobrazuje obrázek 3.6, na kterém je základní profil bez přídatku zakreslen červeně. Změnu, kterou přídatek způsobí, představují dva úseky l_1 , l_2 .



Obr. 3.6 Vliv přídavku

Výpočet úseku l_1 upravuje vztah (3.34).

$$l_1 = \frac{\Delta_s}{\sin \alpha_{P0}} \text{ [mm]} \quad (3.34)$$

Výpočet pomocných úhlů α_a , β_a a vzdálenosti a se provede podle vztahů (3.35), (3.36) a (3.37).

$$\alpha_a = \alpha_{KP0} - \alpha_{P0} \text{ [rad]} \quad (3.35)$$

$$\beta_a = \frac{\pi}{2} + \alpha_{P0} \text{ [rad]} \quad (3.36)$$

$$a = \frac{\Delta_s}{\cos \alpha_{P0}} \text{ [mm]} \quad (3.37)$$

Vzdálenost b se stanoví s využitím sinové věty (3.38).

$$b = \frac{a \cdot \sin \beta_a}{\sin \alpha_a} \text{ [mm]} \quad (3.38)$$

Výpočet pomocného úhlu γ_a a vzdálenosti l_2 upravují vztahy (3.39) a (3.40).

$$\gamma_a = \frac{\pi}{2} - \alpha_{KP0} \quad [rad] \quad (3.39)$$

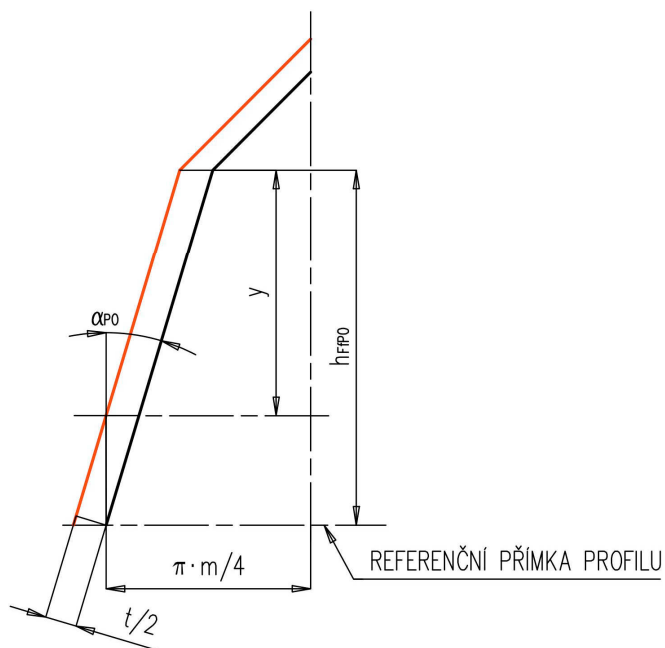
$$l_2 = b \cdot \sin \gamma_a \quad [mm] \quad (3.40)$$

Výslednou hodnotu h_{FP0} při přídavku Δ_s na bok zubu stanoví vztah (3.41).

$$h_{FP0} = y - l_1 - l_2 \quad [mm] \quad (3.41)$$

Vliv tolerance t rozměru přes zuby je zobrazen na obrázku 3.7. Červeně je nakreslen základní profil bez tolerance a černě profil s minusovou tolerancí. Pro výpočet se volí střední hodnota tolerance s ohledem na znaménko. Hodnota h_{FP0} se vypočte ze vztahu (3.42).

$$h_{FP0} = y - \frac{t}{2 \cdot \sin \alpha_{P0}} \quad [mm] \quad (3.42)$$

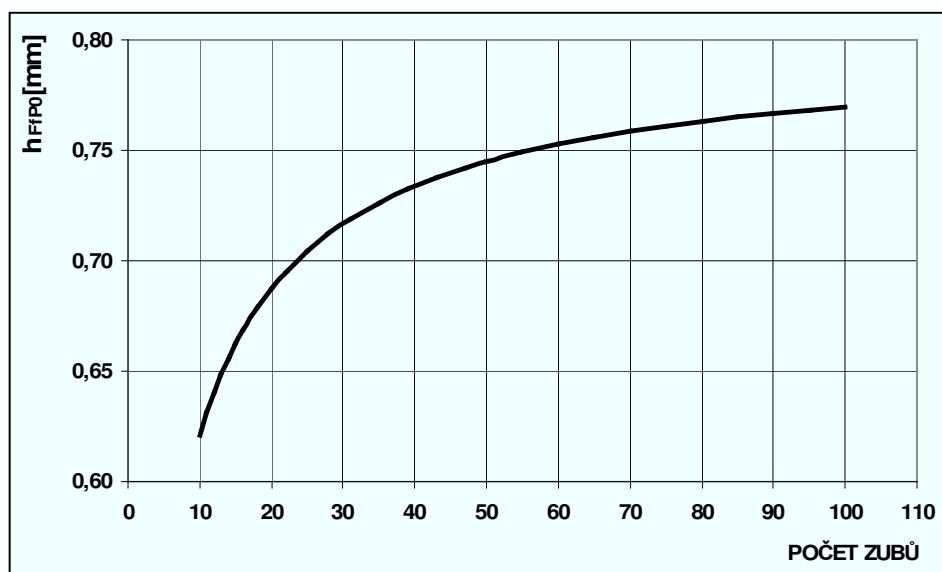


Obr. 3.7 Vliv tolerance

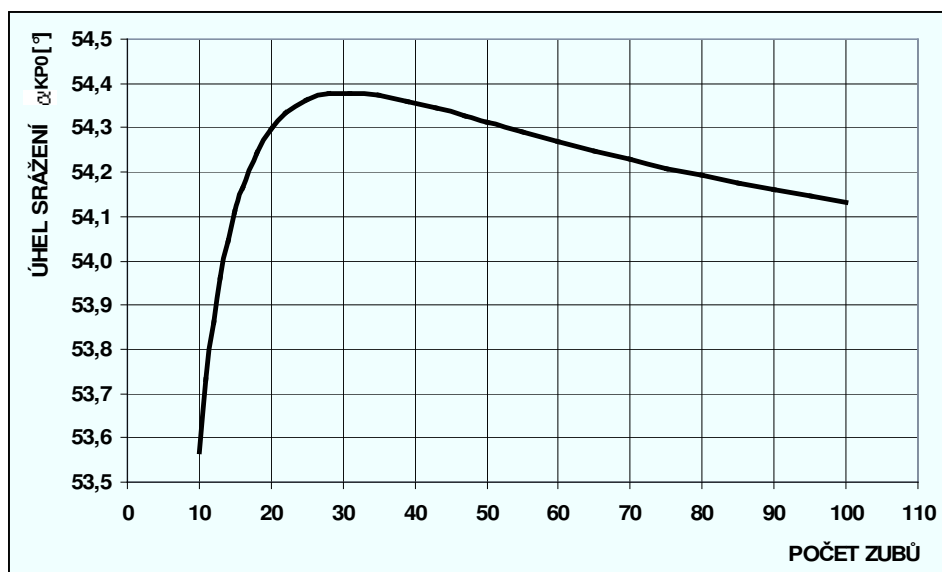
Kombinovaný vliv tří faktorů na hodnotu h_{FP0} upravuje vztah (3.43).

$$h_{FP0} = y - x \cdot m - l_1 - l_2 - \frac{t}{2 \cdot \sin \alpha_{P0}} \quad [mm] \quad (3.43)$$

Na obrázcích 3.8 a 3.9 jsou znázorněny změny h_{FPO} a úhlu α_{KP0} v závislosti na počtu obráběných zubů v intervalu 10 až 100. Vstupní parametry ozubení: modul = 1, $\alpha = 20^\circ$, $\beta_0 = 0^\circ$, $x = 0,5$, výška sražení 0,2 mm, šířka sražení 0,2 mm a tolerance = 0.



Obr. 3.8 Graf závislosti h_{FPO} na počtu obráběných zubů

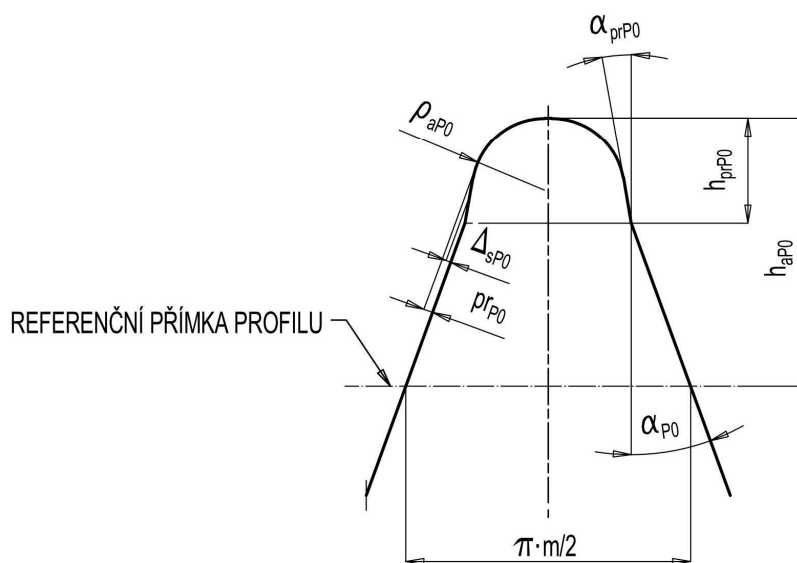


Obr. 3.9 Graf závislosti úhlu sražení α_{KP0} na počtu obráběných zubů

Uvedené grafy ukazují značnou závislost h_{FPO} na počtu zubů obráběného ozubení. Změna je nejvýraznější u ozubení s malým počtem zubů. Skutečné rozdíly ve výšce h_{FPO} jsou však ještě větší, neboť se zmenšováním počtu zubů kola dochází také ke zmenšení výšky hlavy a navýšení jednotkového posunutí. Změna úhlu břitu sražení při zachování shodné šířky a výšky sražení je minimální a z hlediska funkce hrany u ozubení je tento rozdíl zanedbatelný.

3.3 Modifikovaný profil odvalovací frézy pro zhotovení výstupní vůle

Odvalovací frézy se zesílenou hlavou pro vytvoření výstupní vůle jsou frézy hrubovací, označované jako protuberanční. Základní profil těchto fréz se liší od standardního typu ve výstupku na hlavě, který přesahuje nad rovné boky základního profilu. Účelem výstupku je vytvořit prostor podřezáním paty zubu kola. Uplatnění protuberančních fréz je především pro hrubování, po kterém následuje broušení, loupání, nebo ševingování. Tyto dokončovací operace nesmí obrábět ozubení v patě zubu, aby se zabránilo oslabení cementační vrstvy nebo vzniku schodku, které vede k oslabení celého zubu. Odlehčení také usnadňuje provádění dokončovacích operací a má příznivý vliv na kvalitu ozubení i životnost nástrojů. Podřezání zubu je nutné provést mírně větší než je přírůstek na následné opracování, neboť nelze zaručit plynulé napojení finálního obrábění na vyhrubovaný zub. Mezi nevýhody protuberančních fréz patří zmenšení úhlu hřbetu na boku protuberance a jistá omezení použitelnosti v případech kol s malým počtem zubů, pro možný vznik nepřijatelné velikosti podřezání paty zubu. Na obrázku 3.10 [3] je zobrazena část všeobecně užívaného základního profilu protuberanční frézy.



Obr. 3.10 Část základního profilu protuberanční frézy

Pro zobrazený základní profil frézy se záběrovým úhlem 20° je doporučená hodnota úhlu protuberance $\alpha_{prp0} = 10^\circ$ [3] a velikost poloměru zaoblení $\rho_{ap0} = 0,4$ modulu [3]. Velikost přírůstku Δ_{sp0} pro broušení nebo loupání upravuje vztah (3.44) [3].

$$\Delta_{sp0} = 0,09 + 0,0125 \cdot m \text{ [mm]} \quad (3.44)$$

Šířka protuberance pr_{p0} je navržena s ohledem na mírné podřezání paty zubu, které je vyhovující pro 15 [3] a více obráběných zubů. Výpočet upravuje vztah (3.45) [3].

$$\begin{aligned} pr_{p0} &= 0,129 + 0,029 \cdot m \text{ [mm]} && \text{pro modul} \leq 7 \\ pr_{p0} &= 0,181 + 0,0235 \cdot m \text{ [mm]} && \text{pro modul} > 7 \end{aligned} \quad (3.45)$$

Výšku hlavy h_{ap0} upravuje vztah (3.46) [3], v tomto případě je výsledná výška paty na ozubeném kole 1,4 modulu. Výšku hlavy lze změnit, pokud to vyžaduje výkresová dokumentace ozubení, ale neměla by klesnout pod 1,25 modulu [3] u standardního ozubení.

$$h_{ap0} = 1,4 \cdot m + \frac{\Delta_{sp0}}{\sin \alpha_{p0}} \text{ [mm]} \quad (3.46)$$

Výšku protuberance h_{prp0} lze stanovit podle vztahu (3.47) nebo řešit graficky.

$$h_{prp0} = \rho_{ap0} - \frac{\rho_{ap0} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{p0} + \alpha_{prp0}}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\alpha_{p0} - \alpha_{prp0}}{2}\right)} + \frac{pr_{p0} \cdot \cos \alpha_{prp0}}{\sin(\alpha_{p0} - \alpha_{prp0})} \text{ [mm]} \quad (3.47)$$

Při hloubce frézování na jmenovitý rozměr patního průměru je výsledný přírůstek na bok zubu větší o polovinu provozní vůle, neboť tloušťka zubu po dokončení je menší než teoretická, která je stanovena bez vůle. Vhodnou minusovou toleranci rozměru přes zuby pro frézování lze přírůstek na bok zubu zmenšit. Zmenšení rozměru provedené radiálním nastavením frézy při obrábění je v souladu s minusovou tolerancí patního průměru ozubení.

4 NÁVRH ODVALOVACÍ FRÉZY

Obsahem návrhu odvalovací frézy pro obrábění ozubení vložené hřídele je zpracovat kompletní výkresovou dokumentaci nástroje. Návrh vychází z hodnot ozubení, rozměrů hřídele, provozního použití frézy a výrobních možností nástroje. Nedílnou součástí návrhu je prověření možnosti alternativního použití, případně sjednocení nástroje také pro obrábění spoluzabírajících kol. Cílem je navrhnout nástroj, který respektuje požadavky kvality obrábění za současného zohlednění ekonomického provozu i ceny nástroje.

4.1 Výpočet základního profilu nástroje

Základní profil nástroje pro obrábění modifikovaného ozubení je závislý mimo jiné na počtu zubů obráběného ozubeného kola. Vložená hřídel obsahuje dvě ozubení, které se shodují v základních parametrech ozubení, ale liší se v počtu zubů. Základním krokem návrhu je prošetření možnosti sjednocení nástroje pro ozubení s rozdílným počtem zubů, které se provede porovnáním výšky a úhlu modifikace pro srážení hrany. Vstupní údaje ozubení obsahují tabulky 1.1 a 1.2. Výkresová dokumentace předepisuje šířku a výšku sražení $0,6 + 0,4$ mm na hlavě pro ozubení vložené hřídele i pro spoluzabírající kola. Hodnoty h_{FPO} a α_{KP0} vypočtené pomocí vztahů (3.31), (3.32) a (3.43) pro šířku a výšku sražení 0,8 mm uvádí tabulka 4.1.

Tab. 4.1 Hodnoty základního profilu frézy h_{FPO} a α_{KP0} pro uvažované obráběné ozubení

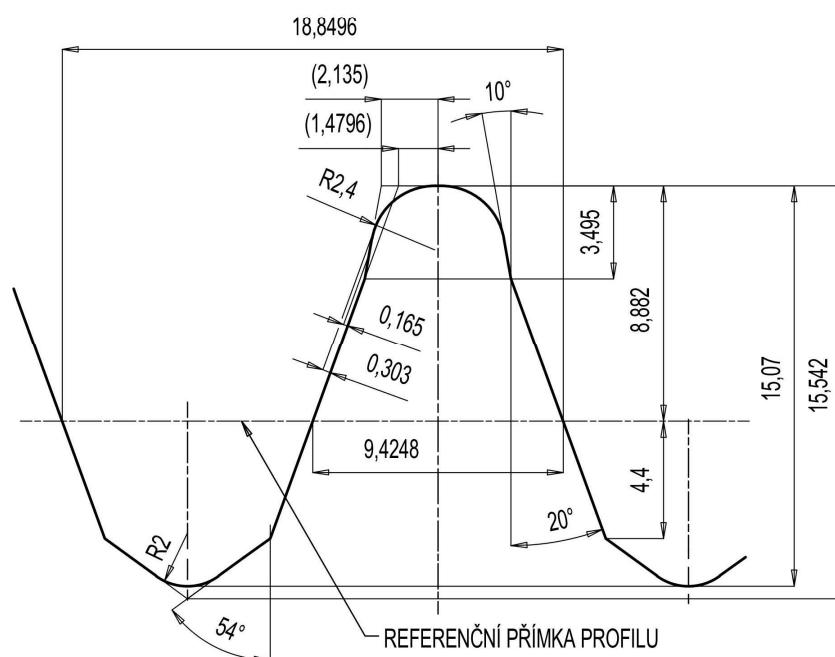
	Vložená hřídel		Spoluzabírající ozubená kola		
Počet zubů	31	43	21	33	37
Výška h_{FPO}	4,39	4,47	4,28	4,42	4,45
Úhel α_{KP0}	54,02°	53,94°	54,05°	54°	53,98°

Výsledné hodnoty výšky h_{FPO} a úhlu α_{KP0} vykazují přijatelné rozdíly u jednotlivých ozubených kol. Zpětným výpočtem se zvolenou hodnotou výšky $h_{FPO} = 4,40$ a úhlu $\alpha_{KP0} = 54^\circ$ je provedena kontrola na velikost výsledné hrany (tab. 4.2).

Tab. 4. 2 Velikost sražení vzniklých hran při hodnotách profilu frézy $h_{FPO} = 4,40$ a $\alpha_{KP0} = 54^\circ$

	Vložená hřídel		Spoluzabírající ozubená kola		
Počet zubů	31	43	21	33	37
Výška hrany	0,79	0,88	0,68	0,82	0,86
Šířka hrany	0,79	0,88	0,68	0,82	0,86

Velikost výsledných hran pro zvolené hodnoty je s ohledem na jejich toleranci přijatelná. Přechod mezi jednotlivými břity srážení je v základním profilu realizován přechodovým rádiusem, který se nepodílí na obrábění. Ozubení vložené hřídele i ozubení spoluzabírajících kol má odlehčenou patu zubu. Odlehčení se vyrábí frézou s modifikovanou hlavou zubu. Protuberanční modifikace nástroje není v tomto případě závislá na počtu obráběných zubů, ale pouze na velikosti přídavku, který je u všech uvažovaných kol totožný. Výpočet rozměrů protuberantu se provádí podle vztahů (3.44 až 3.47), do kterých jsou dosazeny hodnoty ozubení. Navrhovaný modifikovaný základní profil odvalovací frézy, zobrazený na obrázku 4.1, je vyhovující pro nástroj, kterým lze obrábět ozubení vložené hřídele i spoluzabírajících kol.



Obr. 4.1 Základní profil navrhované odvalovací frézy

4.2 Výpočet průměru, počtu hřebenů a chodu navrhované odvalovací frézy

Obrábění menšího ozubení vložené hřídele je omezeno prostorem pro výjezd nebo nájezd nástroje. Prostor je vymezen hlavovým průměrem většího ozubení, patním průměrem obráběného ozubení a vzdáleností mezi nimi. Technologický požadavek na upnutí hřídele při obrábění určuje její polohu tak, že větší ozubení je blíže k upínacímu stolu stroje. V tomto případě lze při použití pravořezné frézy uvažovat o třech možných variantách frézování, na které má vliv omezující prostor. Je to sousledné frézování s nájezdem mezi ozubení bez

kontaktu frézy s obrobkem, druhou možností je sousledné frézování s radiálním nájezdem do frézovaného ozubení. Třetí možnost je nesousledné frézování, kde nutný prostor pro výjezd je shodný s prostorem pro sousledné frézování s radiálním zafrézováním. Před provedením výpočtu průměru frézy je nutné stanovit smysl stoupání závitu frézy. Vhodnější je v tomto případě volit směr totožný se smyslem ozubení. Levochodá fréza má úhel vytočení při frézování roven rozdílu úhlů ozubení a závitu frézy, což umožní volit průměr frézy větší než u frézy pravochodé. Využitím vztahů (2.6), (2.7) a (2.10) se stanoví maximální průměry pro jednotlivé varianty frézování. Pro první variantu nájezdu bez kontaktu s obrobkem je maximální průměr levochodé frézy 85 mm. Tato hodnota je stanovena bez rezervy, a výsledný průměr frézy musí být ještě o něco menší. Fréza s takto malým průměrem je pro frézování modulu 6 nevhodná. Pro druhou a třetí variantu vychází maximální průměr frézy 158 mm. Volbou frézy s roztečným průměrem 120 mm, která má hlavový průměr přibližně 137,8 mm se získá rezerva 7 mm v axiálním směru pro bezproblémový nájezd nebo výjezd frézy. Část rezervy se také uplatní při navýšení průměru frézy o pozitivní korekci.

Počet hřebenů odvalovací frézy značně ovlivňuje parametry obrábění a tím i ekonomické výsledky frézování. Stanovení počtu hřebenů je zjednodušeně rozhodnutí o optimalizaci na výkon nebo životnost nástroje. Pro optimální návrh by bylo nutné znát veškeré veličiny, které obrábění ovlivňují, to však ve většině případů není možné. Jisté optimalizace lze dosáhnout u velkosériové výroby opakovaným návrhem nástroje, ve kterém se promítnou nedostatky zjištěné při provozu. Ani takto optimalizované řešení však nemá všeobecnou platnost, neboť například změna ceny obráběcího času ovlivní poměr nákladů na nástroje v ceně obrobku. Změnou poměru nákladů se může původně výhodný návrh změnit na méně výhodný, nebo opačně.

Volba počtu hřebenů je omezena dolní hranicí, kterou určuje dovolená odchylka obáلكové sítě od evolventy a horní hranicí, danou zhotovitelností hřbetních ploch. Pro frézu navrhovaného rozměru je minimální počet hřebenů 10 [3] a maximální počet přibližně 24. Volbu v tomto rozsahu je možné provést podle příslušné normy nebo porovnáním se standardně vyráběnými nástroji, u kterých se většinou pohybuje počet hřebenů v rozmezí 12 až 17. Přesnější stanovení počtu hřebenů vychází z předpokladu shodného otupení břitu při stejném počtu řezů, odebírajících maximální tloušťku třísky. Zachováním shodné maximální tloušťky třísky a navýšením počtu hřebenů se nelineárně zvýší posuv na otáčku, což vede ke snížení počtu řezů jednotlivých zubů na jednotku dráhy. Nevýhodou je, že se současně s navýšením počtu hřebenů také zkrátí využitelná část zubu.

Porovnání parametrů navrhované frézy pro počet hřebenů 10 až 20 je zachyceno v tabulce 4.3. Hodnoty v tabulce jsou zpracovány pro hrubování ozubení s 31 zuby jednochodou frézou o průměru 138 mm, hloubkou řezu 13 mm při maximální odřezávané tloušťce třísky 0,25 mm. Příslušný axiální posuv na otáčku obrobku je stanoven podle vztahu (2.12) a využitelná část zubu pro předpokládaný úhel hřbetu 11,5 na hlavě zubu podle vztahu (2.43). Pro vyhodnocení je jako základ považována fréza s deseti hřebeny, od které je určena základní dráha, která se rovná posuvu na otáčku obrobku. Počet řezů jednoho zubu frézy na základní dráze je roven počtu otočení frézy při přejezdu základní dráhy. Pro frézu s deseti hřebeny to znamená 31 řezů. Počet řezů pro frézu s jiným počtem hřebenů se vypočítá jako součin počtu zubů kola a poměru posuvů, kde je v čitateli vždy posuv frézy s deseti hřebeny. Samotný poměr posuvů představuje relativní počet řezů jednoho zubu frézy na jeden zub obráběného kola a základní dráhu. Relativní počet řezů představuje míru předpokládaného relativního otupení břitu. Poměr úhlu využitelné části zubu a relativního počtu řezů představuje životnost frézy vztahenou na frézu s deseti hřebeny. V tabulce 4.3 jsou uvedeny výsledné hodnoty posuvu a životnosti frézy přepočítané na procenta, kde základ 100% tvoří fréza s deseti hřebeny.

Tab. 4.3 Porovnání parametrů odvalovacích fréz s deseti až dvaceti hřebeny

Počet hřebenů	Maximální odřezávaná tříska [mm]	Posuv na otáčku obrobku [mm]	Využitelná část zubu [°]	Relativní počet řezů	Relativní posuv [%]	Relativní životnost [%]
10	0,25	1,92	14,63	1,0000	100	100
11	0,25	2,26	12,35	0,8491	118	99
12	0,25	2,63	10,49	0,7313	137	98
13	0,25	3,02	8,95	0,6374	157	96
14	0,25	3,42	7,65	0,5613	178	93
15	0,25	3,85	6,55	0,4986	201	90
16	0,25	4,31	5,60	0,4464	224	86
17	0,25	4,78	4,78	0,4022	249	81
18	0,25	5,27	4,07	0,3647	274	76
19	0,25	5,78	3,44	0,3323	301	71
20	0,25	6,32	2,89	0,3043	329	65

Zvýšení počtu hřebenů frézy se projeví na životnosti, která představuje počet obrobených kusů, pozvolným snižováním, které se s navyšujícím počtem hřebenů stupňuje. Nárůst posuvu, který představuje čas obrábění, je progresivně stoupající, což vede ke značnému

snížení obráběcího času. Pro samotný výběr ekonomicky optimálního počtu hřebenů, jsou nejdůležitější údaje o ceně obráběcího času a nástroje vztažené na jeden obrobek. Doplňující informace, mezi které patří například kapacitní možnosti, použitelnost frézy pro více ozubených kol, celkový počet potřebných nástrojů, snížení četnosti seřízení při přestřování nástroje, nebo technologické požadavky rozhodnutí dále upřesňují. Pro navrhovanou frézu je po zohlednění základních údajů tak vychází 15 hřebenů. U takto navržené frézy se předpokládá dlouhá životnost a uspokojivé obráběcí parametry, vyhovující také pro druhé ozubení vložené hřídele, případně pro spoluzabírající kola.

Určení počtu chodů odvalovací frézy se provádí na základě maximální odřezávané tloušťky třísky a hloubky stopy od axiálního posuvu. Maximální tloušťka odřezávané třísky pro danou frézu a obráběné ozubené kolo určuje velikost maximálního axiálního posuvu. Maximální axiální posuv však nelze uplatnit vždy, a o jeho použitelnosti rozhoduje hloubka stopy od axiálního posuvu. Přijatelná hloubka stopy od posuvu je v případě hrubování ozubení pro broušení podstatně vyšší než u ozubení frézovaného hotově. Ekonomicky nejvýhodnější počet chodů frézy určuje podmínka maximálního součinu chodů a axiálního posuvu. Součin počtu chodů a posuvu pro jedno až tříchodou frézu je porovnán v tabulce 4.4. Tabulka je doplněna procentuálním vyjádřením obráběcího času. Vstupní parametry ozubení a obrábění jsou totožné jako u stanovení počtu hřebenů. Velikosti axiálních posuvu a hloubky stop od axiálního posuvu jsou vypočteny podle vztahů (2.12) a (2.13).

Tab. 4.4 Porovnání parametrů odvalovací frézy s počtem chodů 1 až 3

Počet chodů	1	2	3
Maximální odřezávaná tříška [mm]	0,25	0,25	0,25
Axiální posuv na otáčku obrobku [mm]	3,85	1,17	0,58
Hloubka stopy od axiálního posuvu [mm]	0,0095	0,0009	0,0002
Součin chodů a posuvu	3,85	2,35	1,75
Relativní obráběcí čas [%]	100	164	220

Navýšení počtu chodů u navrhované frézy se projeví značným poklesem axiálního posuvu při zachování shodné maximální třísky. Pokles posuvu není při zachování stejné řezné rychlosti dostatečně kompenzován násobnou rychlostí otáčení obrobku pro vícechodé frézy. Součin počtu chodů a axiálního posuvu ukazuje, že pro dané podmínky je nejvhodnějším řešením využití jednochodé frézy. Názorně se porovnání variant chodů projeví

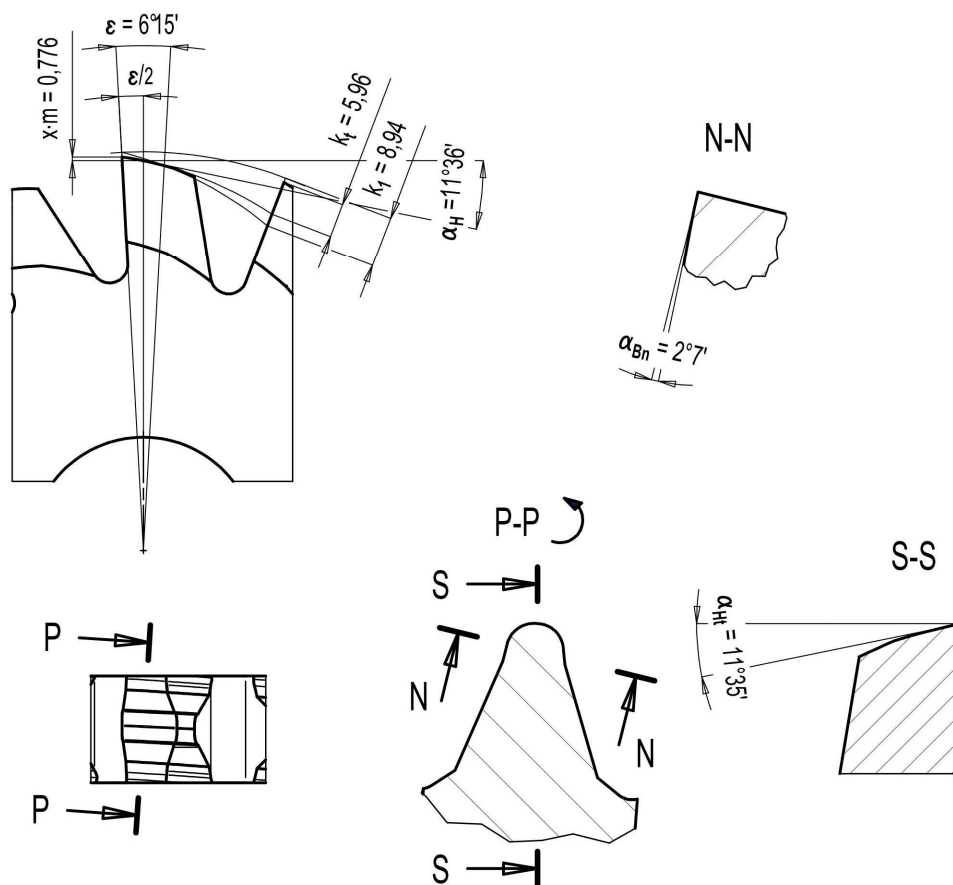
v procentuálním vyjádření obráběcího času. Dvouchodá fréza při porovnání s jednochodou vykazuje navýšení obráběcího času na 164% a tříchodá na 220%. Výsledky výpočtu obráběcího času pro ostatní uvažované ozubení jsou obdobné. Hloubka stopy od axiálního posuvu je největší pro jednochodou frézu a její hodnota pro uvažovaný axiální posuv je přibližně 0,01 mm. Tato hodnota je s ohledem na velikost přídatku vyhovující.

4.3 Výpočet základních konstrukčních parametrů a geometrie břitu navrhované frézy

Navrhované řešení frézy vychází z předběžné znalosti roztečného průměru, od kterého budou stanoveny nezbytné hodnoty frézy. Prvotním výpočtem se stanoví úhel závitu frézy, který mimo jiné vymezuje prostor pro určení provedení řezných drážek. Úhel závitu frézy stanovený podle (2.15) je $2^{\circ}51'58''$ a řezné drážky budou provedeny jako přímé. Pro konstrukci i výrobu je nutné určit osové stoupání závitu, které je u jednochodé frézy totožné s osovou roztečí. Osové stoupání navrhované frézy určené podle (2.18) je 18,8732 mm.

Určení geometrie břitu frézy předchází volba úhlu čela a podmíněné určení úhlu hřbetu. Úhel čela je zvolen 0° , s ohledem na minimální změny profilu při opakovaném ostření. Velikost úhlu hřbetu na hlavě zubu je podmíněna minimálním úhlem hřbetu na boku zubu. Nejmenší úhel hřbetu u navrhované frézy, která má modifikovanou hlavu, je na přechodu zaoblení do úhlu protuberance. Toto obecně kritické místo odvalovacích nástrojů je zvýrazněno poměrně malým úhlem protuberance, který činí 10° . Přibližná hodnota úhlu hřbetu na hlavě zubu, se při zanedbání rozdílu mezi úhlem hřbetu a technologickým úhlem hřbetu ve směru závitu frézy, vypočítá podle vztahu (2.52). Pro hodnotu úhlu hřbetu na boku zubu 2° vychází předběžně úhel na hlavě $11,5^{\circ}$. Úhel hřbetu na boku zubu musí být po výpočtu přesných hodnot frézy zkontrolován na jeho minimální hodnotu 2° [6]. Úhel hřbetu zubu vzniká podsoustružením a následným broušením kruhovým kotoučem. Brusný kotouč se pohybuje cyklicky v radiálním směru o část hodnoty skoku vačky během otáčení frézy mezi jednotlivými hřebeny. Velikost skoku vačky k se vypočítá podle vztahu (2.31) a u navrhované frézy činí 5,87. Řešením soustavy rovnic (2.44) a (2.45) se získá koncový úhel broušení a limitní poloměr frézy v tomto bodě. Dosazením koncového úhlu broušení do vztahu (2.46) se určí úhel podbroušení zubu frézy ε , který určuje využitelnou část zubu a pro navrhovanou frézu má hodnotu $6^{\circ}15'$. Pomocí vztahů (2.47) a (2.48) se získají hodnoty teoretického skoku vačky k_t a velikost posunutí základního profilu frézy. Navrhovaná fréza má hodnotu teoretické vačky 5,96 mm a posunutí základního profilu 0,776 mm. Dosazením posunutí základního profilu do vztahu (2.49) se vypočítá průměr hlavové kružnice nové frézy, která má

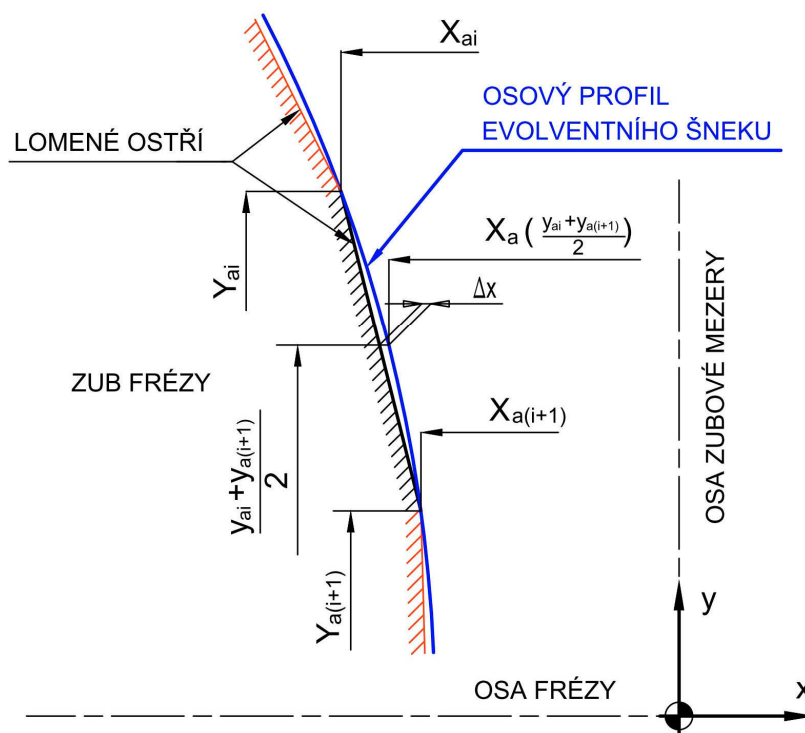
u navrhované frézy hodnotu 139,316 mm. Kontrola normálního úhlu hřbetu v místě přechodu zaoblení do úhlu protuberance se provádí podle vztahu (2.52), do kterého se dosadí technologický úhel hřbetu pro průměr 133,8 mm a záběrový úhel protuberance 10° . Úhel hřbetu v místě přechodu zaoblení se vypočítá podle vztahu (2.31), do kterého se dosadí místo hodnoty hlavového průměru frézy hodnota 133,8 mm a místo vačky k hodnota teoretické vačky k_t . Příslušný technologický úhel hřbetu se vypočítá dosazením do vztahu (2.51), ve kterém se zamění hodnota hlavového průměru frézy za průměr 133,8 a úhel hřbetu na hlavě zubu za úhel hřbetu v místě přechodu. Normální úhel hřbetu v místě přechodu zaoblení do úhlu protuberance má pro navrhovanou frézu vyhovující hodnotu $2^\circ 7'$. Skutečný úhel hřbetu na hlavě zubu se vypočítá dosazením příslušných hodnot do vztahu (2.38) a jeho hodnota pro navrhovanou frézu je $11^\circ 36'$. Výpočet geometrie břitu je doplněn hodnotou odlehčovací vačky $k_1 = 8,94$ mm (2.50), pod kterou se podsoustružuje neaktivní hřbet zubu, který nejde obrousit. Vypočtené hodnoty geometrie břitu navrhované frézy pro zvolený průměr brusného kotouče 80 mm jsou zakresleny na obrázku 4.2.



Obr. 4.2 Geometrie zubu navrhované odvalovací frézy

4.4 Výpočet osového profilu navrhované frézy

Osový profil odvalovací frézy se využívá při výrobě a kontrole nástroje. Východiskem pro jeho stanovení je základní profil odvalovací frézy. Navrhovaná fréza má modifikovaný základní profil, který je složen ze tří základních částí a doplněn přechodovým zaoblením. Hlavní část profilu tvoří úseky vytvářející evolventní profil boku zubu. Tato část profilu má rozhodující význam pro kvalitu obráběného ozubení. U navrhované frézy se jedná o úseky se záběrovým úhlem 20° . Výpočet osového profilu se provádí pro zubovou mezeru nekorigované frézy z důvodu umístění tohoto profilu v polovině využitelné části zubu. Odvalovací fréza, která má přímé řezné drážky má osový profil totožný s osovým profilem evolventního šneku. Osový profil evolventního šneku tvoří obecné křivky, které jsou pro výrobu nevhodné. Nahrazením obecné křivky lomenou čarou, která prochází vybranými body křivky (x_{ai} , y_{ai}) vznikne lomené ostří (obr. 4.3).

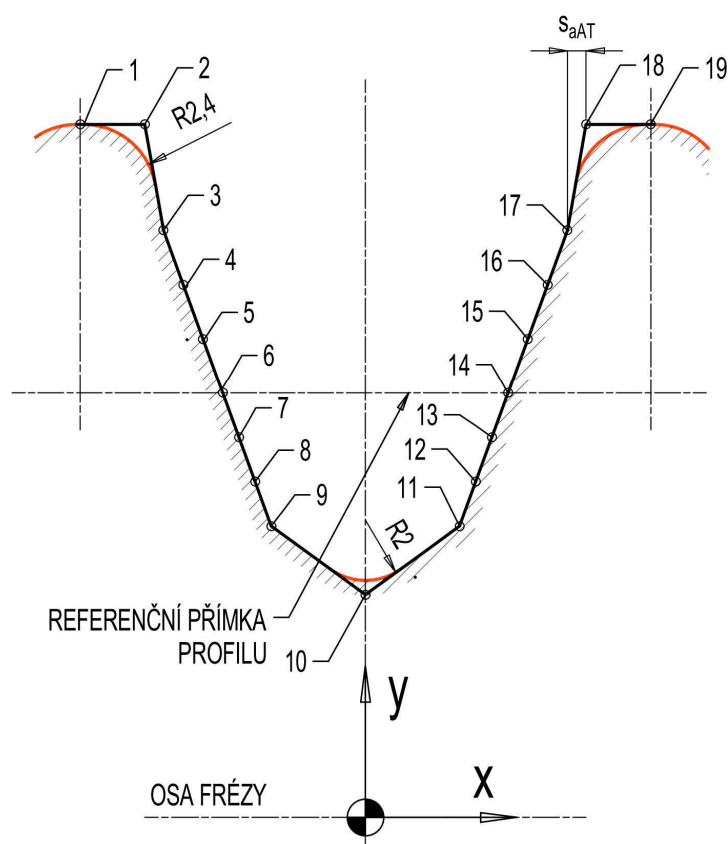


Obr. 4.3 Odchylka lomeného ostří odvalovací frézy od osového profilu evolventního šneku

Rozdělení křivky na přímé úseky se provádí vhodnou volbou souřadnice y . Volené hodnoty y musí být souřadnicí koncových bodů uvažované části základního profilu a roztečného poloměru frézy, který je totožný s referenční přímkou profilu. Další souřadnice y se volí mezi koncovými body a roztečným poloměrem. Počet souřadnic se volí tak, aby vzniklá odchylka mezi lomeným ostřím a obecnou křivkou nepřesáhla výrobní možnosti

broušení profilu. Stanovení odchylky Δ_x , mezi lomeným ostřím a obecnou křivkou ve směru osy x upravuje vztah (4.1), kde jednotlivé proměnné jsou znázorněny na obrázku 4.3, hodnoty x_a jsou souřadnice evolventního šneku v osovém řezu pro jednotlivá i a pro střed mezi nimi. Ve většině případů postačuje volba sedmi souřadnic, která je provedená také pro navrhovanou frézu. Výpočet souřadnic vybraných bodů upravují vztahy (2.54) a (2.55) vycházející z profilu evolventního šneku. Vypočtené hodnoty pro body znázorněné na obrázku 4.4 jsou uvedeny v souhrnné tabulce 4.5.

$$\Delta_x = \left| \frac{x_{ai} + x_{a(i+1)}}{2} - x_{a\left(\frac{y_{ai} + y_{a(i+1)}}{2}\right)} \right| [mm] \quad (4.1)$$



Obr. 4.4 Označení osového profilu zubové mezery navrhované odvalovací frézy

Druhou část profilu představuje modifikace na hlavě zubu frézy. Protuberanční hlava zubu frézy obrábí záběrově neaktivní profil ozubení. Požadovaná přesnost pro neaktivní části profilu ozubení je nižší než v případě aktivního profilu. Osový profil protuberance příslušného evolventního šneku je z tohoto důvodu možné nahradit přímkovým profilem Archimédova šneku. Náhradou vznikne jen nepatrná odchylka, která se na funkci ozubení neprojeví. Stanovení osového profilu pro Archimédův přímkový šnek vychází ze společného

bodu hlavního a protuberačního ostří v základním profilu frézy. Společný bod určený výškou v základním profilu je totožný s koncovým bodem hlavního břitu a tato návaznost platí také v osovém profilu frézy. Určení druhého bodu Archimédova šneku, který leží na hlavovém průměru frézy, umožňuje stanovení osově šířky s_{aAT} (znázorněno na obrázku 4.4) vymezené tvořící přímkou Archimédova šneku a znalost koncového bodu aktivního profilu frézy. Souřadnice bodu v osovém profilu pravé strany zubové mezery frézy ve směru osy x se vypočítá součtem osově šířky s_{aAT} a příslušné souřadnice koncového bodu aktivního profilu. Souřadnice bodu na levé straně zubové mezery má zápornou číselnou hodnotu souřadnice x pro pravou stranu. Výpočet osově šířky s_{aAT} upravuje vztah (4.2).

$$s_{aAT} = \frac{h_{prP0} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{prP0}}{\cos \gamma_0} \text{ [mm]} \quad (4.2)$$

Třetí část profilu představuje modifikace na patě zubu frézy. Srážecí břity obrábějí hranu na hlavovém průměru zubů po jejich délce. Výrobní tolerance obráběné hrany umožňuje nahrazení přesného osového profilu Archimédovým přímkovým profilem. Výpočet osového profilu v tomto případě není nutný, neboť srážecí břity mají společný bod, který je výškově určen přímo základním profilem a není posunut z osy zubové mezery. Koncové body těchto břitů jsou totožné s koncovými body hlavních břitů.

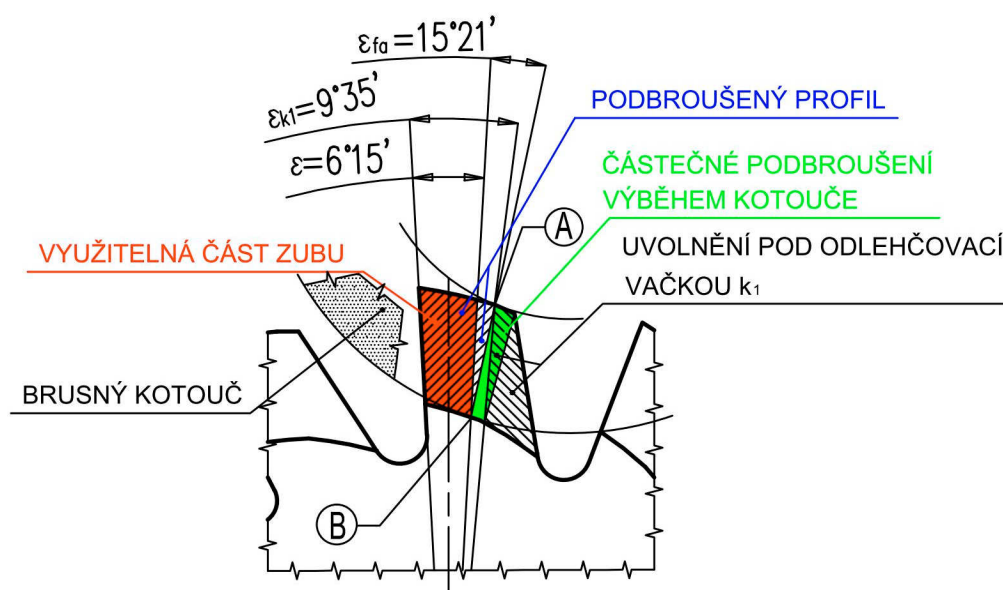
Počáteční a koncový bod celého osového profilu se stanoví jako polovina osově rozteče frézy s přihlédnutím na znaménko. Souřadnice y těchto bodů jsou shodné se základním profilem, při ztotožnění referenčních přímek profilů. Zaoblení hlavy v základním profilu frézy je provedeno tečně napojeným rádiusem $\rho_{aP0} = 2,4 \text{ mm}$. V osovém profilu frézy se při zanedbání velmi malé chyby změny rádiusový oblouk na část elipsy. Orientace hlavní poloosy elipsy je ve směru osy frézy a její délka se rovná podílu původního rádiusu a kosinu úhlu γ_0 . Délka vedlejší poloosy je rovna původnímu rádiusu. Při použití shodného rádiusového zaoblení ze základního profilu do osového profilu frézy vzniká chyba závislá na velikosti poloměru a úhlu stoupání závitu frézy. Rozhodnutí o nutnosti změnit rádiusové zaoblení na část elipsy je odvislé od vzniklé maximální chyby, která se vyhodnotí mezi elipsou a rádiusem kolmo k tečně elipsy v tečném bodě. U navrhované frézy není náhrada elipsou nutná. Rozdíl mezi ponechaným rádiusem a zvažovanou částí elipsy činí méně než $0,001 \text{ mm}$. Přechodové zaoblení paty zubu lze také provést pomocí části elipsy, ale toto řešení není nutné, neboť zaoblení se nepodílí na obrábění ozubení.

Tab. 4.5 Souhrnné hodnoty osového profilu navrhované odvalovací frézy

Bod	x	y	Δ_x	Bod	x	y	Δ_x	
1	-9,4366	68,8820		11	3,1160	55,6000	3,73E-05	
2	-7,3000	68,8820		12	3,6498	57,0667		3,45E-05
3	-6,6830	65,3870		13	4,1839	58,5333		
4	-6,0278	63,5913	3,72E-05	14	4,7183	60,0000	4,42E-05	
5	-5,3729	61,7957	4,05E-05	15	5,3729	61,7957		4,05E-05
6	-4,7183	60,0000	4,42E-05	16	6,0278	63,5913		
7	-4,1839	58,5333	3,20E-05	17	6,6830	65,3870		
8	-3,6498	57,0667	3,45E-05	18	7,3000	68,8820		
9	-3,1160	55,6000	3,73E-05	19	9,4366	68,8820		
10	0,0000	53,3400						

4.5 Výpočet řezné drážky navrhované frézy

Řezné drážky odvalovací frézy vytvářejí prostor pro odvod třísek při frézování. Prostor drážky musí být objemově dostatečně velký, aby nedocházelo k pěchování třísky. Tvar drážky musí umožňovat snadné uvolnění třísky. Tyto provozní požadavky na velikost řezné drážky doplňují výrobní a pevnostní omezení. Odvalovací frézy s broušeným profilem jsou nejvíce omezeny technologií výroby, která má požadavek na drážku co největší a protichůdným požadavkem na pevnost zubu. Při zohlednění obou faktorů vycházejí drážky objemově dostatečně velké a problémy s objemem a uvolněním třísek se téměř nevyskytují. Velikost a tvar řezné drážky úzce souvisí s vytvářením hřbetních ploch zubů frézy, které jsou znázorněny na obrázku 4.5.



Obr. 4.5 Hřbetní plochy zubu navrhované odvalovací frézy

Hřbetní plochy podbroušeného zubu frézy lze rozdělit na několik částí. Rozdělení vyplývá z rozdílné úhlové délky výbrusu. Využitelná část zubu je ohraničena úhlem ε a konec podbroušeného profilu vymezuje přímka AB, která svírá s čelní osou procházející bodem B, úhel ε_{fa} . Tento šikmý konec podbroušení umožňuje u některých fréz prodloužit využitelnou část zubu až do bodu, ve kterém se protne čelo odostřené frézy s přímkou AB a hlavovou kružnicí obráběného ozubení. Výpočet přibližné hodnoty úhlu ε_{fa} , při zanedbání posunutí základního profilu frézy, upravuje vztah (4.3). Vzniklá chyba zanedbáním posunutí je velmi malá a pro konstrukci frézy bezvýznamná.

$$\varepsilon_{fa} = \xi_L + \arctg \frac{r_{fL} \cdot \sin \xi_L}{W_{FKL} - r_{fL} \cdot \cos \xi_L} [rad] \quad (4.3)$$

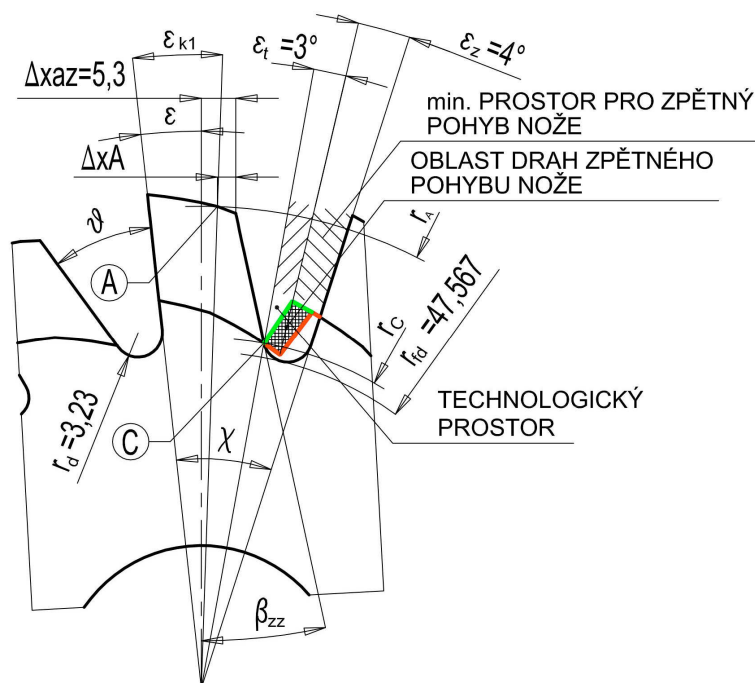
Bod A je koncovým bodem podbroušení hřbetu zubu na hlavovém průměru frézy. Tento bod určuje maximální vzdálenost, ve které musí navazovat hřbet zubu zhotovený pod odlehčovací vačkou k_1 . Uvolnění zadní části zubu prováděné z důvodu nemožnosti obroušení a usnadnění výběhu brusného kotouče by mělo teoreticky kopírovat přímku AB. Realizace takto podsoustruženého zubu je technologicky náročná. Podsoustružení se provádí dvěma tvarovými noži s rozdílným profilem pro každou vačku nebo jedním nožem s negativním úhlem čela. První varianta je časově i přípravově náročná, druhá vyžaduje větší prostor pro výběh podtáčecího nože. Tyto nedostatky jsou ve většině případů odstraněny volbou výrobně vhodnějšího místa napojení odlehčeného hřbetu zubu. Napojení se provádí po přímce protínající střed frézy a bod A. Vyhrubování frézy tímto způsobem mírně zhoršuje podmínky pro broušení profilu, ale na funkci frézy nemá negativní vliv. Úhel hřbetu na bocích zubů zůstává zachován a část odlehčeného profilu hřbetu je obroušena výběhem brusného kotouče. Radiální podsoustružení lze u tohoto způsobu provádět jedním nožem s využitím kombinované vačky. Výpočet přibližné hodnoty maximálního úhlu ε_{k1} pro napojení odlehčeného hřbetu upravuje vztah (4.4), který se řeší numerickou metodou.

$$\left[r_{fL} + h_{p0} + \frac{k_t \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{k1})}{\chi} \right] \cdot \left[\sin(\varepsilon + \xi_L - \varepsilon_{k1}) + \cos(\varepsilon + \xi_L - \varepsilon_{k1}) \cdot \operatorname{tg}(\varepsilon_{fa} - \xi_L) \right] - W_{FKL} \cdot \operatorname{tg}(\varepsilon_{fa} - \xi_L) = 0 \quad (4.4)$$

Radiální podsoustružení prováděné pomocí vačky vyžaduje volný prostor před čelem následujícího zubu. Volný prostor je realizován vhodným tvarem řezné drážky, kterou lze z pohledu podsoustružení rozdělit na dvě části. První částí je prostor pro zpětný pohyb nože,

který je vymezen úhlem ε_z . Výpočet úhlu ε_z upravuje vztah (4.5), který vychází z konstrukce vačky stroje a pro navrhovanou frézu činí 4° , situace je znázorněna na obrázku 4.6.

$$\varepsilon_z = \frac{\chi}{6} [\text{rad}], [^\circ] \quad (4.5)$$



Obr. 4.6 Řezná drážka a zub navrhované odvalovací frézy

Druhou část představuje technologický prostor, určený pro jistou rezervu výběhu nože a výrobní možnost nastavení požadovaného úhlu napojení odlehčeného hřbetu. Technologický prostor tak umožňuje využití jedné kombinované vačky s pevným rozhraním, mezi hlavní a uvolňovací vačkou pro různé úhly přechodu hřbetu. Velikost technologického prostoru se pohybuje přibližně na úrovni jedné osminy úhlu mezi hřebeny. Navrhovaná fréza má úhel technologického prostoru $\varepsilon_t = 3^\circ$. Volba úhlu rozevření řezné drážky ϑ určuje, mimo jiné, velikost zůstatkového úhlu zubu β_{zz} , který má podstatný vliv na pevnost zubu. Vhodný úhel zůstatku zubu vychází z teorie vetknutého nosníku o stejné pevnosti. Výsledkem výpočtu myšleného nosníku, pro dovolené napětí a velikost řezné síly na zub v oblasti hlavy frézy, je obecná křivka zadního tvaru zubu. Aproximací obecné křivky přímkou vychází kladný úhel zubu β_{zz} v rozmezí 5 až 15° pro frézu s úhlem záběru 20° . Výpočet úhlu β_{zz} při zvoleném úhlu rozevření drážky upravuje vztah (4.6).

$$\beta_{zz} = \vartheta + \varepsilon - \chi [\text{rad}], [^\circ] \quad (4.6)$$

Úhel rozevření ϑ se ve většině případů volí 30° a to bez ohledu na počet hřebenů, neboť odostřený zub má obdobný boční profil. Zůstatkový úhel zubu β_{zz} je u navrhované frézy $12^\circ 15'$ při zvoleném úhlu rozevření řezné drážky 30° . Výpočet pomocného poloměru r_C pro bod C, který je společným bodem Archimédovy spirály od vačky k_1 , ramene úhlu ε_t , ramene úhlu ϑ a současně tečným bodem poloměru zaoblení paty řezné drážky r_d , upravuje vztah (4.7).

$$r_C = r_{f0} - \frac{k_t \cdot \left(\varepsilon_{k1} - \frac{\varepsilon}{2} \right)}{\chi} - \frac{k_1 \cdot (\chi - \varepsilon_{k1} - \varepsilon_t - \varepsilon_z)}{\chi} \text{ [mm]} \quad (4.7)$$

Velikost poloměru zaoblení paty řezné drážky r_d upravuje vztah (4.8). Vypočtená hodnota poloměru zaoblení pro navrhovanou frézu činí 3,229 mm, tato hodnota se po provedení dalších výpočtů vhodně zaokrouhlí.

$$r_d = \frac{r_C \cdot \sin(\varepsilon_t + \varepsilon_z) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\vartheta}{2}\right)}{\sin(\pi - \vartheta)} \text{ [mm]} \quad (4.8)$$

Výpočet patního poloměru řezných drážek r_{fd} se provede podle vztahu (4.9), hodnota u navrhované frézy činí 47,567 mm.

$$r_{fd} = \sqrt{\left\{ \frac{r_C \cdot [\sin(\varepsilon_t + \varepsilon_z) + \sin(\vartheta - \varepsilon_t - \varepsilon_z)]}{\sin(\pi - \vartheta)} \right\}^2 + r_d^2} - r_d \text{ [mm]} \quad (4.9)$$

Vypočtené a volené hodnoty řezné drážky je nutné zkontrolovat prostřednictvím zůstatkové šířky zubu Δ_{xaz} na hlavovém průměru odostřené frézy. Kontrolní výpočet je rozdělen do dvou kroků. Prvním krokem výpočtu je zjištění hodnoty Δ_{xA} , která určuje část hřbetu zubu, kterou protíná myšlená přímka ztotožněná se zadní částí bočního profilu zubu. Pomocný výpočet poloměru frézy r_A v bodě A upravuje vztah (4.10) a hodnoty Δ_{xA} vztah (4.11).

$$r_A = r_{a0} - \frac{k_t \cdot \left(\varepsilon_{k1} - \frac{\varepsilon}{2} \right)}{\chi} \text{ [mm]} \quad (4.10)$$

$$\Delta_{xA} = r_C \cdot \sin(\chi - \varepsilon - \varepsilon_t - \varepsilon_z) - \operatorname{tg}(\vartheta + \varepsilon - \chi) \cdot [r_A \cdot \cos(\varepsilon_{k1} - \varepsilon) - r_C \cdot \cos(\chi - \varepsilon - \varepsilon_t - \varepsilon_z)] - r_A \cdot \sin(\varepsilon_{k1} - \varepsilon) \text{ [mm]} \quad (4.11)$$

Záporná hodnota Δ_{xA} vypočtená ze vztahu (4.11) určuje, že myšlená přímka protíná hřbet zubu vyrobený pod vačkou k_t . Výpočet zůstatkové šířky Δ_{xaz} pro tento případ upravuje vztah (4.13), do kterého se dosadí hodnota φ_{x1} , ta se vypočítá numerickým vyřešením pomocného vztahu (4.12).

$$\begin{aligned} & \left(r_{a0} - \frac{\varepsilon \cdot k_t}{2 \cdot \chi} - \frac{\varphi_{x1} \cdot k_t}{\chi} \right) \cdot \sin \varphi_{x1} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} + \vartheta + \varepsilon - \chi \right) + r_c \cdot \cos(\chi - \varepsilon - \varepsilon_t - \varepsilon_z) + \\ & + \frac{r_c \cdot \sin(\chi - \varepsilon - \varepsilon_t - \varepsilon_z)}{\operatorname{tg}(\vartheta + \varepsilon - \chi)} - \left(r_{a0} - \frac{\varepsilon \cdot k_t}{2 \cdot \chi} - \frac{\varphi_{x1} \cdot k_t}{\chi} \right) \cdot \cos \varphi_{x1} = 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\Delta_{xaz} = \left(r_{a0} - \frac{\varepsilon \cdot k_t}{2 \cdot \chi} - \frac{\varphi_{x1} \cdot k_t}{\chi} \right) \cdot \sin \varphi_{x1} \text{ [mm]} \quad (4.13)$$

Kladná hodnota Δ_{xA} vypočtená ze vztahu (4.11) určuje, že myšlená přímka protíná hřbet zubu vyrobený pod vačkou k_1 . Výpočet zůstatkové šířky Δ_{xaz} pro kladnou, nebo nulovou hodnotu Δ_{xA} upravuje vztah (4.15), který se vypočítá po numerickém vyřešení pomocného vztahu (4.14) pro určení φ_{x2} .

$$\begin{aligned} & \left(r_A - \frac{\varphi_{x2} \cdot k_1}{\chi} \right) \cdot \sin(\varepsilon_{k1} + \varphi_{x2} - \varepsilon) \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} + \vartheta + \varepsilon - \chi \right) + r_c \cdot \cos(\chi - \varepsilon - \varepsilon_t - \varepsilon_z) + \\ & + \frac{r_c \cdot \sin(\chi - \varepsilon - \varepsilon_t - \varepsilon_z)}{\operatorname{tg}(\vartheta + \varepsilon - \chi)} - \left(r_A - \frac{\varphi_{x2} \cdot k_1}{\chi} \right) \cdot \cos(\varepsilon_{k1} + \varphi_{x2} - \varepsilon) = 0 \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\Delta_{xaz} = \left(r_A - \frac{\varphi_{x2} \cdot k_1}{\chi} \right) \cdot \sin(\varepsilon_{k1} + \varphi_{x2} - \varepsilon) \text{ [mm]} \quad (4.15)$$

Kontrolovaná hodnota zůstatkové šířky zubu musí z pevnostních důvodů dosahovat minimální hodnoty 0,5-0,8 modulu. Při nesplnění této podmínky je nutné upravit jeden nebo více volitelných parametrů nástroje. Určitá možnost pro zesílení zubu je v možném zúžení technologického prostoru, případně zkrácení využitelné části zubu. Prodloužení šířky zubu na hlavě změnou úhlu rozevření řezné drážky nemá ve většině případů žádný význam, neboť zub se úměrně nerozšíří v oblasti paty a po zatížení dojde k vylomení celého zubu. Při návrhu frézy nelze z výrobních důvodů ve většině případů zúžit prostor pro zpětný pohyb nože nebo minimální zůstatkovou šířku zubu. Navrhovaná fréza má šířku $\Delta_{xaz} = 5,3 \text{ mm}$, což odpovídá přibližně 0,9 modulu. Vypočtené hodnoty se nepatrně změní zaokrouhlením rozměrů a využitím výrobních tolerancí, tyto úpravy však nemají podstatný vliv na již vypočtené hodnoty a funkci nástroje.

4.6 Určení doplňujících rozměrů a parametrů navrhované frézy

Navrhovaná fréza je řešena jako nástrčná s otvorem o průměru 40 H5 a podélnou upínací drážkou se šířkou 10 D10. Upínací drážku je vhodné umístit proti řezné drážce, z důvodu zmírnění zeslabení tělesa frézy. Upínací otvor frézy je proveden s odlehčením střední části na průměr 41 mm v délce 60 mm, toto odlehčení je provedeno z důvodu usnadnění broušení otvoru. Celková délka frézy 160 mm je volena s ohledem na možnost krokování frézy a závitová část je při šířce nákrůžků 5 mm dlouhá 150 mm. Průměr kontrolních nákrůžků nesmí být přerušen řeznými drážkami a zároveň nesmí neúměrně zmenšovat čelní upínací plochy. Volba průměru nákrůžků se provádí s ohledem na velikost ostatních rozměrů v rozmezí 1 - 5 mm pod patním průměrem řezných drážek a u navrhované frézy činí 90 mm. Délka využitelné části zubu frézy se zviditelní zafrézováním na hlavovém průměru do prvního obrobeného zubu závitu frézy. Neúplné zuby na začátku a konci závitu frézy, kde obrobení nedosahuje hlavového průměru, se částečně nebo úplně odstraní. Označení frézy, provedené vyfrézováním na čela frézy, slouží k identifikaci a pro nastavení provozních podmínek na obráběcím stroji. Na levé čelo se označuje číslo frézy, modul, úhel záběru, úhel stoupání závitu frézy, řezný materiál a výrobce. Označení pravého čela obsahuje normu profilu zubu, třídu přesnosti a výšku hlavy frézy. Modifikované nebo nenormalizované frézy mají označení rozšířené o údaje, které vymezují použitelnost frézy. Mezi tyto údaje patří například výška počátku modifikace, rozsah obráběných zubů nebo jejich sklon.

Výrobní tolerance a třída přesnosti A je volena dle DIN 3968, tolerance zbylých netolerovaných rozměrů upravuje norma ISO 2768 – mK. Drsnost povrchu u profilu a čela zubů, broušené části upínacího otvoru, nákrůžků a čelních upínacích ploch je obecně požadována co nejmenší a její hodnota by u navrhované frézy neměla přesahovat hranici $R_a = 0,4$. Ostatní obrobené plochy nemají přímou vazbu na kvalitu nástroje a jejich drsnost se pohybuje v rozmezí $R_a = 3,2 - 6,3$.

Řezný materiál odvalovacích fréz musí vyhovět technologickým požadavkům obrábění. Základní rozdělení řezného materiálu lze provést do dvou skupin, kde první skupinu tvoří rychlořezné nástrojové oceli a druhou skupinu slinuté karbidy. Slinuté karbidy nacházejí uplatnění převážně u tvrdého frézování, u klasického obrábění brání vyššímu rozšíření především nepříznivá cena a problematická údržba nástroje. Nejrozšířenějším řezným materiálem pro klasické odvalovací frézování jsou tedy rychlořezné oceli. Nároky kladené na odvalovací frézu, které vyplývají z procesu odvalovacího frézování, vymezují použitelnost druhů rychlořezných ocelí. Mezi vhodné řezné materiály pro obrábění ocelí do pevnosti 900 MPa je možné zařadit ocel 19830. Tato ocel a oceli s obdobným složením nacházejí

uplatnění v malosériové výrobě, ve které jsou kladeny běžné požadavky na výkon nástroje. Široké uplatnění mají rychlořezné oceli s obsahem kobaltu, kde mezi nejpoužívanější patří ocel 19852. Oceli tohoto typu se vyznačují velkou řezivostí, trvanlivostí ostří, houževnatostí, odolností proti popuštění a možností obrábět oceli do pevnosti 1200MPa. Oceli vyrobené práškovou metalurgií vykazují, při shodné tvrdosti, v porovnání s klasicky vyráběnými oceli vyšší houževnatost a odolnost proti opotřebení. Uplatnění těchto ocelí je především v hromadné výrobě, při frézování vysokou řeznou rychlostí, nebo obrábění obtížně obrobitelných materiálů. Mezi nejčastěji používané oceli tohoto typu patří 1.3241 s obchodním označením S390, která je použita také u navrhované frézy. Tepelným zpracováním se u rychlořezných ocelí vyrobených práškovou metodou dosahuje tvrdosti 65 až 67 HRC. Pro zvýšení životnosti a možnosti navýšení řezné rychlosti jsou odvalovací frézy povlakovány. Nejčastěji používaný povlak je TiN nanášený metodou PVD. Tento povlak je vyhovující nejen z hlediska obrábění, ale také z pohledu odpovlakování a opětovného nanášení.

4.7 Shrnutí volených a vypočtených rozměrů navrhované frézy

Základní parametry pro zhotovení odvalovací frézy jsou shrnuty v tabulce 4.6

Tab. 4.6 Souhrnné hodnoty navrhované odvalovací frézy

Roztečný průměr	d_0	120
Smysl stoupání		Levý
Počet hřebenů	i_0	15
Počet chodů	z_0	1
Úhel závitů frézy	γ_0	$2^\circ 51' 58''$
Řezné drážky		Přímé
Osové stoupání	H	18,8732
Úhel čela	γ_H	0°
Radiální vačka	k	5,87
Odlehčovací vačka	k_l	8,94
Teoretická vačka	k_t	5,96
Průměr nové frézy	d'_a	139,316
Úhel hřbetu na hlavě zubu	α_H	$11^\circ 36'$
Průměr brusného kotouče	d_{kot}	80
Posunutí základního profilu	$x \cdot m$	0,776
Využitelná část zubu	ε	$6^\circ 15'$
Úhel hřbetu na boku zubu	α_{Bn}	$2^\circ 7'$
Úhel napojení odlehčovací vačky	ε_{kl}	$9^\circ 35'$
Poloměr paty řezných drážek	r_{fd}	47,567
Poloměr zaoblení dna řezné drážky	r_d	3,229
Úhel rozevření řezné drážky	ϑ	30°

4.8 Výkresová dokumentace navrhované odvalovací frézy

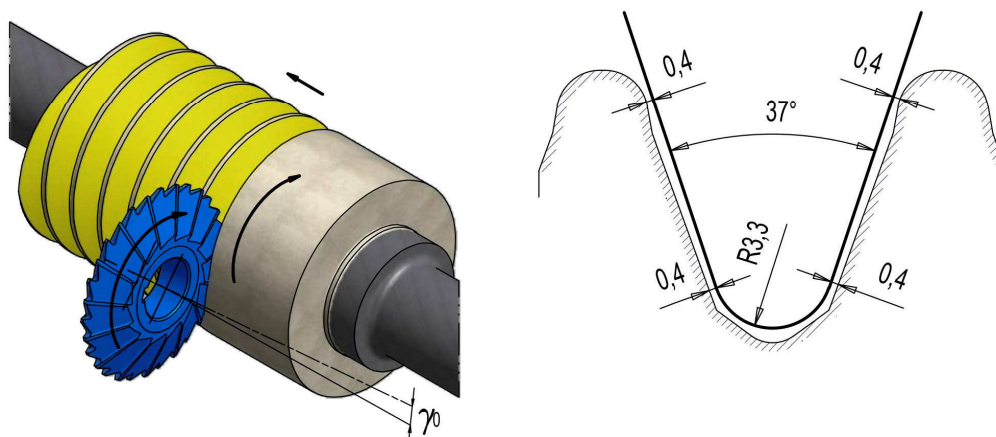
Výkresová dokumentaci navrhované odvalovací frézy obsahuje Příloha A.

5 Technologie výroby odvalovací frézy

Výroba odvalovacích fréz patří mezi specializované odvětví výroby nástrojů. Nároky na kvalitu provedení a výrobní přesnost vyžadují vhodné obráběcí stroje s kvalifikovanou obsluhou. Propojenost konstrukce, technologie a výroby vytváří základ úspěšné realizace nástroje. Navrhovanou odvalovací frézou lze z hlediska technologie výroby rozdělit na dvě skupiny s rozdílnou obtížností zhotovení. První skupina zahrnuje obvyklé operace, u kterých jsou technologické postupy výroby obecně známy. Druhou skupinu představují specifické výrobní operace, které budou následně podrobněji zmíněny.

5.1 Třískové opracování

Třískové obrábění prováděné před tepelným zpracováním začíná soustružením, které je provedeno u otvoru, nákrůžků a povrchu frézy s přídavkem 0,15 mm na plochu. Závit frézy se hrubuje na soustruhu jen u menších modulů. Protažení unášecí drážky se provádí v pomocném upínacím přípravku, který současně slouží jako vedení plochého protahovacího trnu. Hrubování závitů frézy zobrazené na obrázku 5.1 se provádí rovnobokými nebo tvarovými kotoučovými frézami. Rozhodnutí o použití typu kotoučové frézy závisí na členitosti profilu frézované zubové drážky a na náročnosti zhotovení nebo úpravě kotoučové frézy.



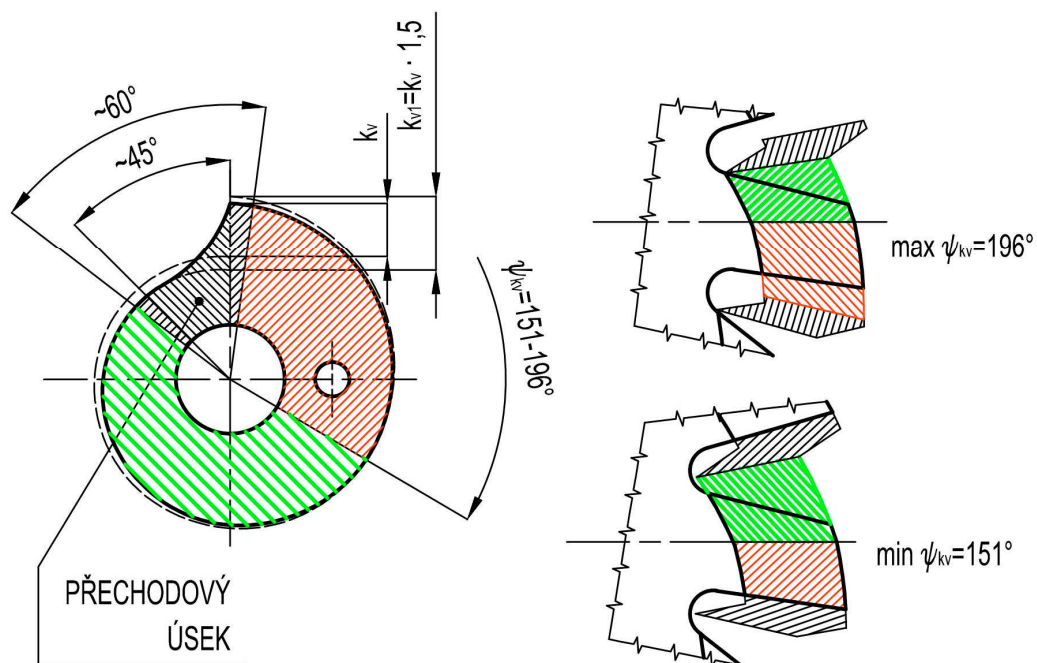
Obr. 5.1 Hrubování závitů frézy, profil kotoučové frézy

Použitím rovnoboké frézy (obr. 5.1) nevznikne ve většině případů konstantní přídavek pro celý profil drážky, ale úprava normalizované frézy je podstatně jednodušší, než v případě frézy tvarové. Závit u fréz velkých modulů se obrábí čepovými frézami. Přídavek na plochu je

závislý na velikosti zhotovovaného nástroje a u navrhované frézy činí 0,4 mm v místě nejmenšího přídavku. Osové stoupání se z důvodu eliminace natažení, které vznikne při tepelném zpracování, zhotovuje menší než je výsledné stoupání. Zkrácené stoupání se získá součinem výsledného osového stoupání H a koeficientu kalení, který má pro většinu používaných řezných materiálů hodnotu přibližně 0,9983. Takto vypočtené zkrácené stoupání se použije také při podsoustružení profilu frézy.

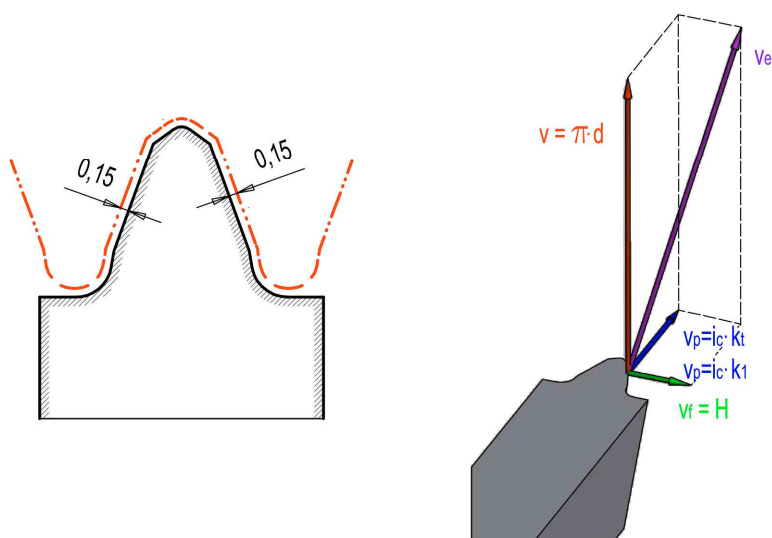
Frézování řezných drážek se provádí kotoučovou frézou dělicím způsobem. Profil kotoučové frézy je při obrábění přímé řezné drážky totožný s jejím profilem. Při obrábění spirálových drážek je profil frézy odlišný a velikost odchylky se zvětšuje s úhlem stoupání řezných drážek. Výpočet profilu frézy se nejčastěji provádí v čelní rovině a doplňuje se údaji o nastavení kotoučové frézy k obrobku. Řezné drážky se frézují s přídavkem 0,3 mm na čele zubů, s ohledem na broušení po tepelném zpracování.

Radiální podsoustružení profilu zubů frézy se provádí tvarovým soustružnickým nožem. Při podsoustružení koná fréza rotační pohyb, tvarový nůž podélný a zároveň cyklický radiální pohyb. Podélný pohyb je odvozen z rychlosti otáčení frézy a je roven požadovanému osovému stoupání frézy. Sdružený podélný a radiální pohyb tvarového nože vytváří hřbetní plochy zubů, které by měly mít v příčném řezu tvar Archimédovy spirály. Jednou z podmínek vzniku hřbetu ve tvaru Archimédovy spirály je, že rychlost radiálního posuvu vůči úhlové rychlosti frézy je konstantní. Tuto podmínku u konvenčních strojů zajišťuje vačka s převodovým mechanismem. Kombinovaná vačka stroje má funkční plochu složenou ze dvou na sebe navazujících Archimédových křivek. Křivky vačky mají rozdílnou strmost, danou požadovaným poměrem, obvykle se jedná o poměr $k_1/k_t = k_{v1}/k_v = 1,5$ [6]. Délku vačky k_v vymezuje úhel ψ_{kv} . Neaktivní část vačky tvoří přechodový úsek široký přibližně 45° , ve kterém se oddálí kopírovací palec od plochy vačky. Oddálení a zpětné přiblížení kopírovacího palce probíhá před a za přechodovým úsekem, čímž se tento úsek určený pro zpětný pohyb nože rozšíří přibližně na 60° . Zpětný pohyb nože se musí uskutečnit vždy v prostoru řezné drážky, která tak musí mít minimální úhlovou šířku, odpovídající jedné šestině úhlu mezi hřebeny. Navrhovaná fréza má řeznou drážku rozšířenu o technologický prostor, který umožňuje použít vačku s úhlem přechodu ψ_{kv} v rozmezí $151 - 196^\circ$. Nastavení umístění požadovaného přechodu odlehčeného hřbetu zubu, pro krajní meze úhlu ψ_{kv} , je společně s vačkou stroje zobrazeno na obrázku 5.2. Výsledné požadované velikosti skoku vačky $k_t = 5,96$, přenášené na zub frézy, se dosáhne nastavením pravítka převodového mechanismu, který umožňuje upravovat rozsah skoku vačky v určitém rozmezí.



Obr. 5.2 Kombinovaná vačka, umístění přechodu odlehčeného hřbetu zubu

Čelní profil tvarového nože je určen ekvidistantou osového tvaru zubové mezery frézy. Vzdálenost ekvidistanty, zobrazené na obrázku 5.3, je rovna přídatku na broušení a u navrhované frézy činí 0,15 mm. Návrh geometrie tvarového nože vychází z vektoru rychlosti řezného pohybu v_e , který je zobrazen na obrázku 5.3. Směr vektoru v_e se v průběhu obrábění mění i pro totožný uvažovaný bod břitu. Na změně směru se podílí proměnlivý průměr frézy, konstantní posuvová složka v_f a posuvová složka v_p , která má dvě rozdílné rychlosti.

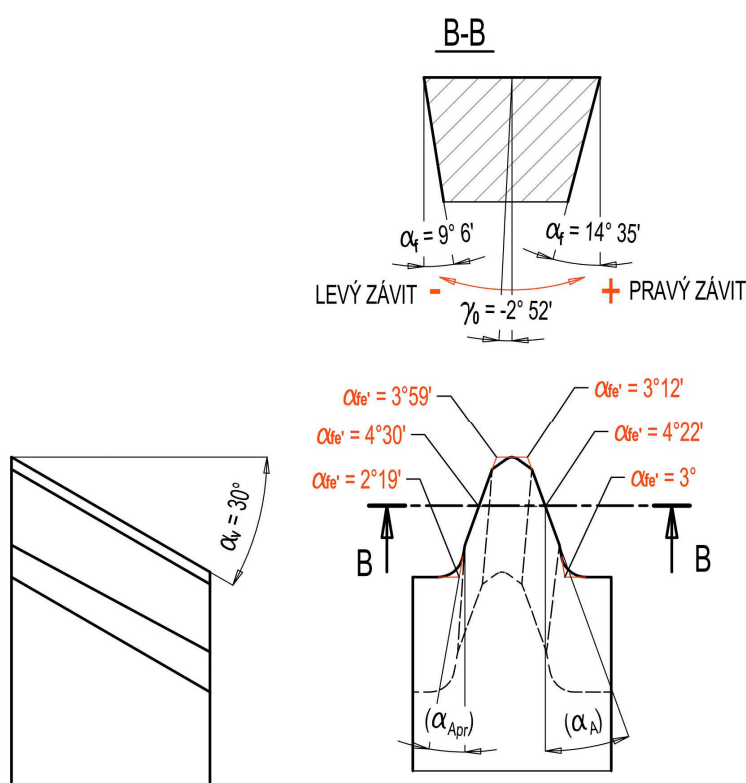


Obr. 5.3 Čelní profil tvarového nože, vektor rychlosti řezného pohybu

Tvarový nůž musí mít pro správnou funkci pozitivní hodnotu pracovního úhlu hřbetu na bocích nože. Vlivem sdruženého posuvu se směr vektoru posuvového pohybu v_{fe} značně odlišuje od zavedeného směru vektoru v_f . Tato změna znesnadňuje klasické stanovení geometrie nástroje. Pro bezproblémovou funkci nože postačuje stanovení pracovního úhlu hřbetu $\alpha_{fe'}$ v nástrojové boční rovině P_f . Výpočet úhlu $\alpha_{fe'}$ pro pravou stranu nože upravuje vztah (5.1) a pro levou stranu (5.2). Vztahy předpokládají pootočení řezné části o úhel γ_0 a vyklonění nože o úhel α_v , tato situace je společně s tvarovým nožem zobrazena na obrázku 5.4.

$$\alpha_{fe'P} = \arctg(tg\alpha_v \cdot tg\alpha_A - tg\gamma_0) - \arctg(tg\alpha_{Hx} \cdot tg\alpha_A - tg\gamma_{0x}) \text{ [rad], } [^\circ] \quad (5.1)$$

$$\alpha_{fe'L} = \arctg(tg\alpha_v \cdot tg\alpha_A + tg\gamma_0) - \arctg(tg\alpha_{Hx} \cdot tg\alpha_A + tg\gamma_{0x}) \text{ [rad], } [^\circ] \quad (5.2)$$



Obr. 5.4 Tvarový nůž

Při zvoleném úhlu α_v slouží uvedené vztahy pro kontrolu geometrie nože, která se provede v několika bodech břitu, nebo pro stanovení úhlu vyklonění na požadovanou minimální velikost úhlu $\alpha_{fe'}$ 1,5 až 2°. Do vztahů se dosazuje úhel profilu α_A , který je možné stanovit z osového profilu zubu frézy, nebo pro přibližný výpočet je možné přímo dosadit záběrový úhel. Dosazovaný úhel hřbetu α_{Hx} se stanoví pro odlehčovací vačku k_1 v požadovaném bodě x a v tomto bodě se také stanoví úhel stoupání závitů frézy γ_{0x} . Pokud

při kontrole v jednotlivých volených bodech nevyjde dostatečný úhel hřbetu α_{fe} , pak je nutné zvětšit úhel vyklopení nože α_v , v případě, že úhly nevycházejí jen na jedné straně nože, je možné změnit úhel pootočení řezné části. Úhly čela nože γ_f a γ_p se ve většině případů volí nula stupňů. Na jedné straně nože tak vzniká negativní pracovní úhel čela, který lze v případě obtíží řešit vybroušením žlábků podél ostří.

Odfrézování neúplných zubů a označení využitelné části zubů se obrábí při jednom upnutí frézy v dělicím přístroji konzolové frézky. Popis vyfrézování na čela frézy je vhodné zhotovit na CNC frézce.

5.2 Tepelné zpracování

Tepelné zpracování, zahrnující žíhání, kalení a popouštění patří mezi operace, které významně ovlivňují výsledné vlastnosti odvalovací frézy. Nejproblematictější proces tepelného zpracování u rychlořezných ocelí je kalení. Dříve nejrozšířenější metoda kalení v solných lázních je dnes nahrazována kalením ve vakuu. Využitím vakuového kalení se odstraní některé nevýhody solných lázní a zároveň lze proces kalení přesněji teplotně regulovat, což se pozitivně projevuje na vzniklé struktuře materiálu. Tepelné zpracování odvalovacích fréz menších rozměrů zahrnuje převážně jen kalení a následné několikanásobné popouštění. Operace tepelného zpracování fréz, z důvodů minimalizace vzniklých deformací, je nutné provádět ve svislé poloze.

Základní operace tepelného zpracování navrhované oceli S390 se dělí na žíhání, kalení a popouštění. Uvedené teploty a délky časových intervalů jsou převzaty z literatury [2].

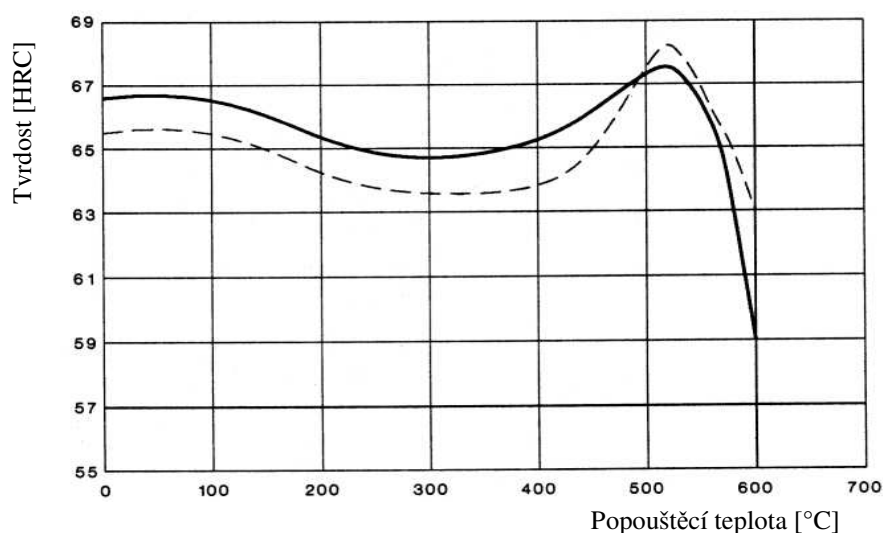
Žíhání na měkko zahrnuje postupný ohřev na teplotu 770 až 840°C, výdrž 4 hodiny a řízené pomalé ochlazování v peci. Ochlazování probíhá o 10 až 20°C každou hodinu, až do teploty 740°C, na které je před dochlazením prodleva 2 hodiny. Žíhání na měkko se provádí pro snížení tvrdosti a u této oceli dosahuje po vyžíhání maximálně 300 HB.

Žíhání k snížení pnutí se zařazuje po rozsáhlém obrábění, nebo v případě tvarově velmi členitých nástrojů, jako mezioperace před dokončením třískového obrábění. Po pozvolném ohřevu na 600 až 650°C, následuje výdrž trvající 1 až 2 hodiny a pomalé ochlazování v peci. O nutnosti aplikace žíhání na měkko nebo k snížení pnutí rozhodují konkrétní podmínky obrábění a tvar nástroje, u navrhované frézy není žíhání nutné.

Kalení je nejvýznamnější tepelné zpracování prováděné u rychlořezných ocelí. Proces kalení představuje ohřev na kalicí teplotu a rychlé ochlazení. Účelem kalení je dosažení požadované struktury a mechanických vlastností zakaleného nástroje. Ohřev na kalicí teplotu

se u vakuového kalení preferuje plynulý, rozdílně od stupňovitého ohřevu v solných lázních. Teplota kalení se u odvalovacích fréz volí při spodní hranici doporučeného teplotního rozsahu 1150 až 1230°C, s ohledem na požadavek jemného zrna a přijatelné houževnatosti. Doba výdrže na kalící teplotě po zahřátí celého nástroje je minimálně 80 sekund, což je nutná časová prodleva pro dostatečné rozpouštění karbidů. Maximální doba výdrže je 150 sekund. Překročením času prodlevy hrozí zhrubnutí zrna, které se projeví poklesem houževnatosti, což vede k poškození nebo znehodnocení nástroje. Čas ohřevu ve vakuové peci závisí na velikosti nástroje a parametrech pece. Řízené ochlazování probíhá v proudu dusíku, případně v oleji.

Účelem popouštění je dosažení vhodnějších mechanických a technologických vlastností zakaleného nástroje. Při popouštění dochází mimo jiné k sekundárnímu vytvrzení v důsledku precipitace karbidů ze zbytkového austenitu a transformaci zbytkového austenitu na martenzit. Trojnásobné popouštění rychlořezných ocelí následuje bezprostředně po kalení a ochlazení na teplotu okolí. Čas ohřevu na popouštěcí teplotu je závislý na tloušťce stěny nástroje a činí pro každých 20 mm jednu hodinu, ale ne méně než 2 hodiny. Minimální výdrž na popouštěcí teplotě je 1 hodina, po které následuje ochlazení na vzduchu. První a druhé popouštění se provádí pro dosažení požadované tvrdosti, třetí s teplotou o 30 až 50°C nižší, než nejvyšší teplota popouštění, pro odstranění vnitřního pnutí. Dosahovaná tvrdost po popouštění je 65 až 69 HRC. Závislost tvrdosti na teplotě popouštění je zobrazena na obrázku 5.5 [2]. Obrázek znázorňuje dvě popouštěcí křivky, čárkovně pro kalící teplotu 1150°C a plnou čarou pro 1210°C.



Obr. 5.5 Závislost dosažené tvrdosti na teplotě popouštění pro ocel 1.3241 - S390

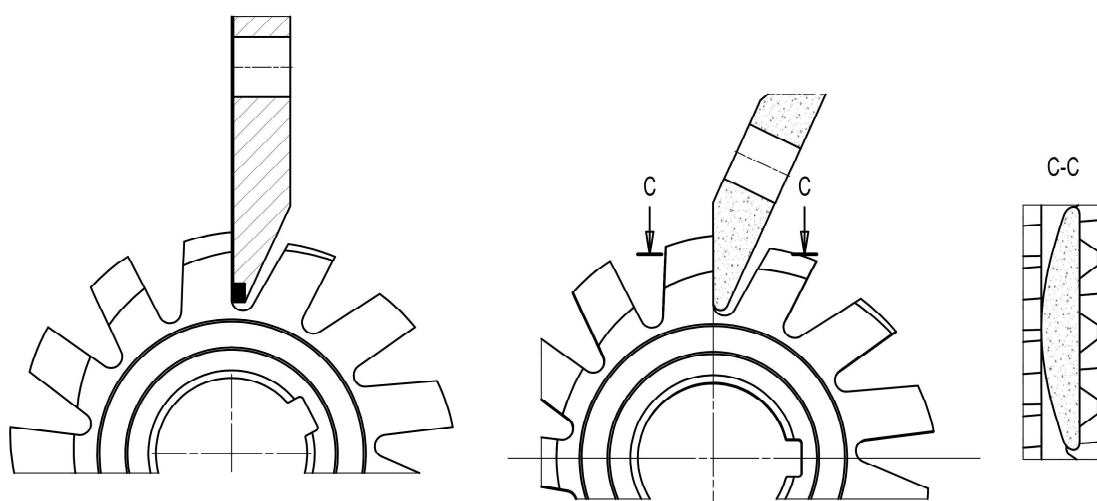
5.3 Broušení

Broušení patří mezi poslední strojní operace výroby odvalovací frézy. Náročnost provedení brusičských operací znesnadňují velmi úzké výrobní tolerance v kombinaci se zhoršenou obrusitelností řezných materiálů. Vhodné obráběcí stroje a vysoká kvalifikace brusičů jsou nezbytnou podmínkou úspěšné realizace těchto operací.

Výchozí operací před dokončovacím broušením finálních rozměrů je rozdělení přídavků a tvarové deformace vzniklé při tepelném zpracování odvalovací frézy. Nástrčné frézy s otvorem se lehce nalisují na brousící trn, který rozměrově odpovídá ponechanému přídavku na otvoru a velikosti vzniklé deformace. Lehkým přebroušením čel a nákrůžků na hrotové brusce vzniknou upínací a středící plochy, které se využijí pro další brusičské operace. Pro tuto operaci je vhodné využít odstupňované sady brousících trnů. U fréz stopkových se regulují středící důlky podle řezné části frézy.

Broušení upínacího otvoru u fréz standardních délek se provádí z jedné strany, na jedno upnutí frézy. Upnutí se realizuje na čelní plochu frézy a vystředění se provede podle nákrůžků. Upínací otvor zhotovený s odlehčením se brousí jako dva nezávislé otvory, neboť by při průběžném broušení docházelo k tvarovým nepřesnostem vlivem výjezdu a nájezdu brusného kotouče z otvoru do odlehčení a obráceně.

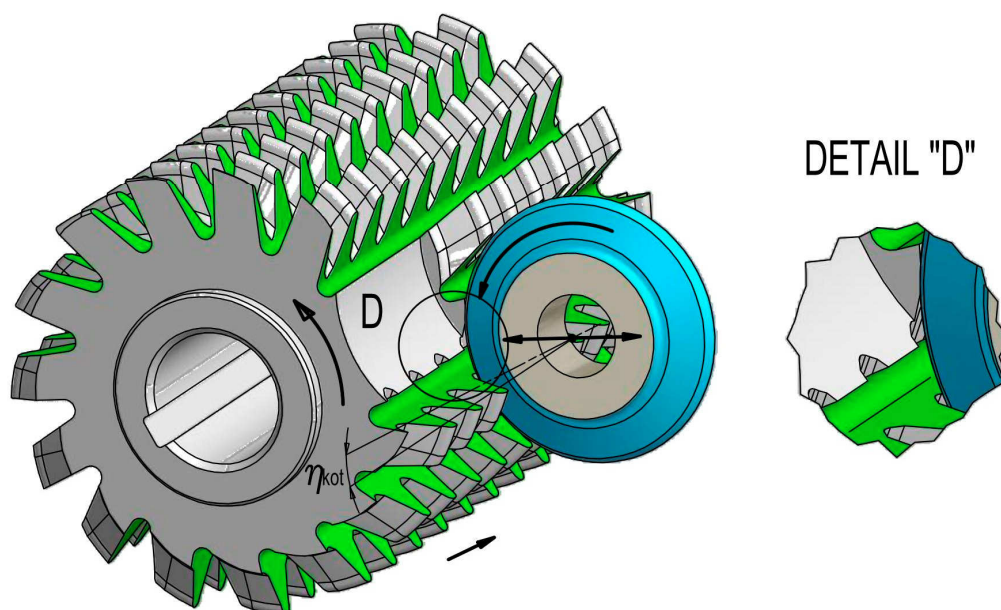
Broušení čel zubů vyžaduje speciální brusku, vybavenou mimo jiné automatickým dělením, s možností nastavení dělení podle počtu hřebenů vyráběné odvalovací frézy. Broušení fréz s přímými řeznými drážkami se v praxi provádí způsoby, které jsou zobrazeny na obrázku 5.6.



Obr. 5.6 Způsoby broušení čel zubů odvalovací frézy

Způsob zobrazený na obrázku vlevo využívá pro broušení brusný kotouč talířového tvaru s brousící vrstvou z kubického nitridu boru. Fréza koná při broušení vratný podélný pohyb a po každém dvojitém chodu se pootočí o úhel mezi hřebeny. Přísuv je realizován vždy jednou za otáčku frézy, jejím mírným pootočením. Druhý způsob broušení kuželovou plochou vykloněného brusného kotouče lze využít také pro broušení fréz, které mají spirálové řezné drážky. Způsob broušení fréz s přímou řeznou drážkou je shodný s popsaným postupem. Fréza se spirálovými drážkami vykonává při broušení, kromě podélného vratného pohybu, také koordinovaný rotační pohyb, čímž je zajištěn výsledný pohyb šroubový. Osa brusného kotouče musí být kromě vyklonění vytočena tak, aby brusný kotouč zabíral středem kuželové plochy. Přesunutím brusného kotouče mimo osu frézy lze brousit pozitivní nebo negativní úhel čela. Pro broušení se používají korundové brusné kotouče, které jsou pravidelně orovnávány. Tepelné zatížení frézy při broušení musí být omezeno na minimum z důvodu nepřipustného vyhřátí řezného materiálu. Drsnost povrchu broušeného čela musí splňovat předepsanou hodnotu, případně dosahovat nižší hodnoty, což se příznivě projeví na funkci a životnosti nástroje. Obdobný postup broušení se uplatňuje také při ostření po provozním otupení frézy.

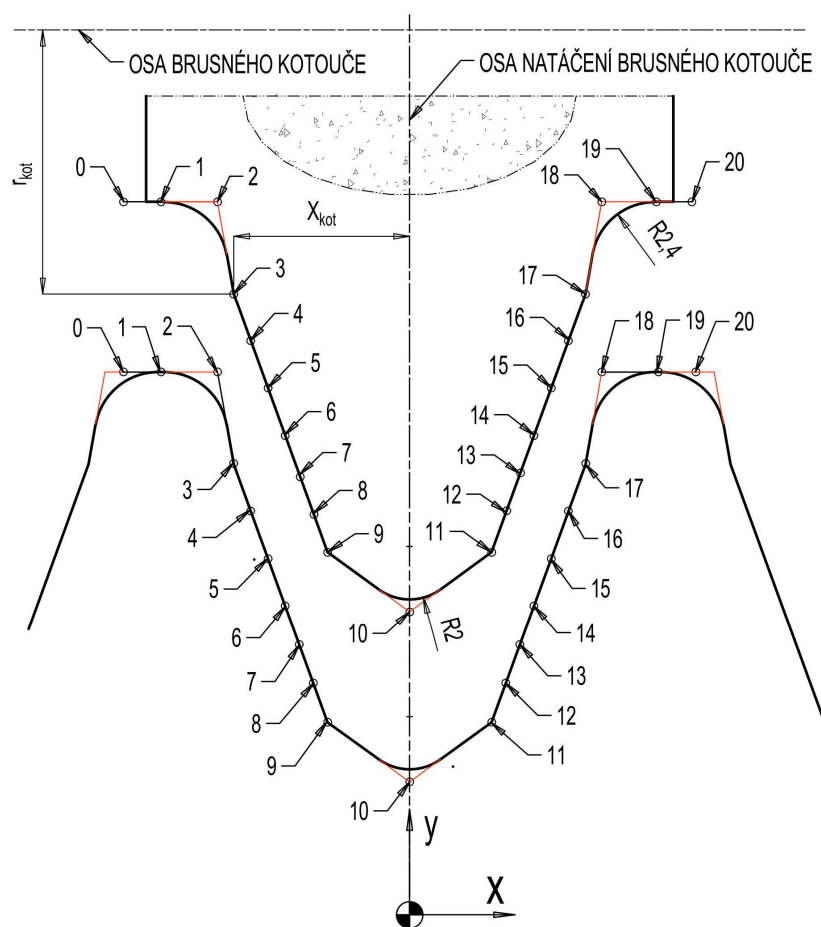
Podbrušování profilu zubů je stěžejní operace výroby odvalovací frézy. Tato operace se provádí na obráběcích stojích speciálně vyvinutých pro tento proces. Časová a technologická náročnost řadí tuto operaci na první místo z hlediska nákladovosti všech prováděných operací při výrobě nástroje. Radiální podbrušování profilu zubů frézy se provádí profilovým brusným kotoučem. Schématicky je proces zobrazen na obrázku 5.7.



Obr. 5.7 Schématický nákres podbrušování profilu odvalovací frézy

Upínání frézy je realizováno nalisováním na trn o velmi malé kuželovitosti. Spojení mezi strojem a trnem s frézou je pomocí přesného unášeče. Fréza při podbrušování koná rotační a relativní podélný pohyb vůči natočenému brusnému kotouči, který koná cyklický radiální pohyb pod vačkou k. Všechny pohyby jsou vzájemně koordinovány podle konstrukčních parametrů vyráběné frézy.

Osový profil brusného kotouče vychází z osového profilu zubové mezery, tyto dva profily však nejsou shodné. Výpočet osového profilu brusného kotouče se provádí pro body, ve kterých je stanoven osový profil frézy, označení bodů zobrazuje obrázek 5.8.



Obr. 5.8 Označení bodů osových profilů brusného kotouče a odvalovací frézy

Výpočet poloměru brusného kotouče r_{kot} upravuje vztah (5.3). Dosazované souřadnice bodů osového profilu frézy x_{ai} , y_{ai} jsou určeny vztahy (2.54), (2.55) a hodnota výchozí vzdálenosti W_{FK} mezi osami frézy a brusného kotouče vztahem (2.40). Brusný kotouč je vždy natočen ve směru závitu frézy a úhel natočení brusného kotouče η_{kot} je pro pravochodou frézu kladný, u levochodé frézy záporný. Hledaná hodnota poloměru brusného kotouče r_{kot} odpovídá minimu funkce při změně proměnné ξ_{xy} . Výsledkem výpočtu, provedeného

vhodnou numerickou metodou, je poloměr kotouče pro zadaný bod na profilu frézy a příslušný úhel počátku broušení ξ_{xy} . V uvedeném vztahu platí znaménko + pro pravochoďovou frézu a znaménko – pro levochoďovou frézu. Při využití vztahu (5.3) pro výpočet vstupních hodnot se do vzorce pro stanovení úhlu hřbetu v libovolném bodě břitu (2.38) dosazovaná souřadnice $x_{ai} = 0$.

$$r_{kot} = \sqrt{\left(W_{FK} - \frac{k_{2\pi} \cdot \xi_{xy}}{2 \cdot \pi} - y_{ai} \cdot \cos \xi_{xy}\right)^2 + \left[\frac{y_{ai} \cdot \sin \xi_{xy}}{\cos \eta_{kot}} + \sin \eta_{kot} \cdot \left(x_{ai} \pm \frac{H \cdot \xi_{xy}}{2 \cdot \pi} - y_{ai} \cdot \operatorname{tg} \eta_{kot} \cdot \sin \xi_{xy}\right)\right]^2} \quad [mm] \quad (5.3)$$

Výpočet souřadnice šířky brusného kotouče x_{kot} , která přísluší poloměru brusného kotouče pro zvolený bod osového profilu frézy, upravuje vztah (5.4). Souřadnice brusného kotouče x_{kot} je stanovena od osy natáčení brusného kotouče v osově rovině brusného kotouče. Do vztahu se dosazuje příslušný úhel počátku broušení ξ_{xy} určený ze vztahu (5.3). Ve vztahu platí znaménko + pro pravochoďovou frézu a znaménko – pro levochoďovou frézu. Vypočtené body osového profilu brusného kotouče se pro stanovení celého profilu propojí přímkami. Souřadnice bodů osového profilu brusného kotouče pro navrhovanou odvalovací frézu jsou shrnuty v tabulce 5.1.

$$x_{kot} = \cos \eta_{kot} \cdot \left(x_{ai} \pm \frac{H \cdot \xi_{xy}}{2 \cdot \pi} - \operatorname{tg} \eta_{kot} \cdot \sin \xi_{xy} \cdot y_{ai}\right) \quad [mm] \quad (5.4)$$

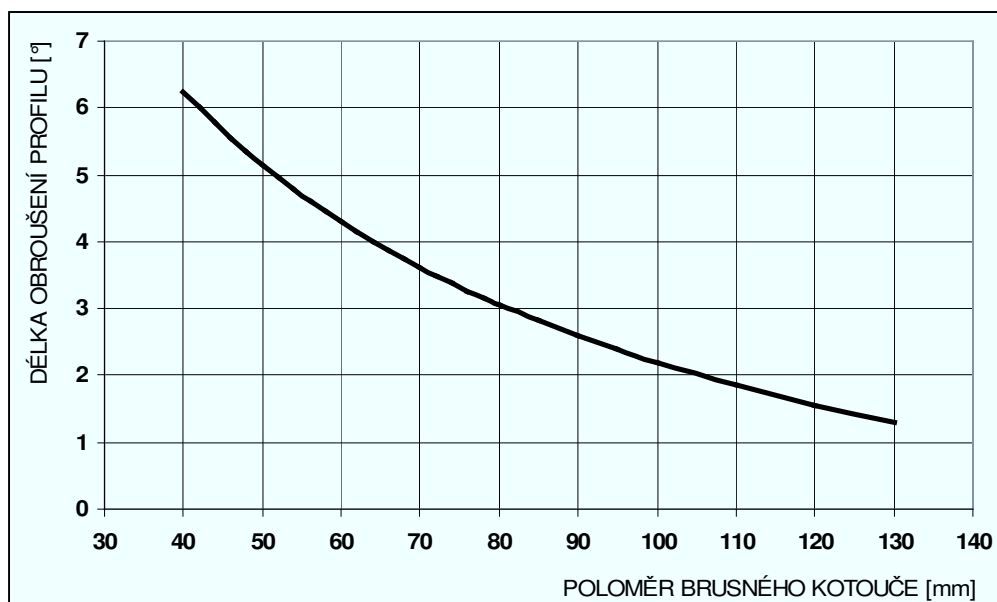
Tab. 5.1 Souřadnice bodů osového profilu brusného kotouče pro navrhovanou frézu

Bod	x_{kot}	r_{kot}	Bod	x_{kot}	r_{kot}
0	-10,3797	25,4126	11	3,1215	38,2445
1	-9,3807	25,4040	12	3,6619	36,8184
2	-7,2464	25,3858	13	4,2017	35,3901
3	-6,6330	28,8005	14	4,7410	33,9597
4	-5,9815	30,5488	15	5,4005	32,2057
5	-5,3314	32,2946	16	6,0592	30,4492
6	-4,6828	34,0378	17	6,7172	28,6902
7	-4,1543	35,4595	18	7,3380	25,2655
8	-3,6271	36,8789	19	9,4724	25,2484
9	-3,1012	38,2962	20	10,4713	25,2405
10	-0,0032	40,4560			

Určení částí tvaru brusného kotouče, kterým se brousí přechodová zaoblení na zubu frézy, je závislé na požadované přesnosti a funkci, kterou zaoblení plní na nástroji. Výpočet tvaru kotouče je založen na zvolení několika bodů zaoblení, které jsou definované v osovému profilu frézy, na jejich přepočtu na souřadnice brusného kotouče a na proložení vypočtených bodů brusného kotouče vhodnou křivkou. Počet bodů se volí podle požadované přesnosti. Výpočet souřadnic brusného kotouče se provede pomocí vztahů (5.3) a (5.4). Určení vhodné křivky je možné provést graficky a u navrhované frézy je vhodné ponechat velikost původních rádiusových zaoblení také ve tvaru brusného kotouče. Vzniklá chyba od ideálního tvaru obecné křivky nepřekračuje 0,004 mm, což je vzhledem k funkci zaoblení přijatelné.

Orovnávání korundových brusných kotoučů se v kusové výrobě provádí diamantovým orovnávačem s přesně definovaným tvarem. Rádiusový tvar orovnávače o poloměru 0,25 nebo 0,125 mm vyhovuje pro většinu vyráběných fréz. Použitím tvarového orovnávače lze na brusném kotouči orovnat celý požadovaný profil a brousit současně celou zubovou mezeru.

Velikost brusného kotouče výrazně ovlivňuje úhel podbroušení profilu ε a tím i využitelnou část zubů frézy. Z tohoto důvodu je snaha volit průměr brusného kotouče co nejmenší. Technologické požadavky na broušení jsou však protichůdné a výsledná velikost kotouče je kompromisní řešení mezi těmito požadavky. Graf na obrázku 5.9 znázorňuje délku podbroušení profilu navrhované frézy pro rozdílné poloměry brusného kotouče.



Obr. 5.9 Závislost délky podbroušení profilu na poloměru brusného kotouče pro navrhovanou odvalovací frézu

Intenzivní chlazení při broušení profilu je nezbytné pro minimalizaci vzniku a odvod vzniklého tepla. Nedostatečné chlazení by způsobilo nepřípustné tepelné poškození, které vede ke snížení životnosti, případně k odlupování vrchní vyhřáté vrstvy zubů nástroje. Chlazení a mazání příznivě ovlivňuje výslednou hodnotu drsnosti broušených ploch, což se pozitivně projeví na životnosti nástroje. Procesní kapalina se také podílí na teplotní stabilizaci broušené frézy, čímž přispívá k výrobní přesnosti, kde se vliv teploty nejvíce projevuje na velikosti stoupání závitu frézy.

Po obroušení profilu se fréza ponechá nalisována na brousícím trnu. Finální broušení čel a nákrůžků frézy, provedené na hrotové brusce při shodném upnutí jako u profilu, zaručuje minimální házivost mezi profilem, čely a nákrůžky. Před povlakováním se vyrobená odvalovací fréza kontroluje, většinou podle normy DIN 3968.

5.4 Rámcový technologický postup výroby odvalovací frézy

Technologické postupy pro výrobu odvalovacích fréz vycházejí z možností výrobních provozů a požadavků vyplývajících z výkresové dokumentace. Vypracované postupy musí zaručit nejen kvalitu nástroje, ale také ekonomický průběh výroby. Tyto požadavky vytvářejí tlak na tvorbu postupů a jejich průběžnou inovaci. Rámcový technologický postup výroby navrhované odvalovací frézy je uveden v tabulce 5.2.

Tab. 5.2 Rámcový technologický postup výroby navrhované odvalovací frézy

Číslo výkresu, pozice:			FO - 001	Výrobní příkaz:	1	
Číslo sestavy:			FO - 001	Středisko:		
Název:			Fréza odvalovací	Datum:	21. 3. 2012	
Počet kusů:			1	List / počet listů:	1	
Materiál, polotovár:			1.3241, ϕ 142 x 165	Vypracoval:	Havelka	
Č. op.	Pracoviště, stroj, tarifní třída		Popis operace	t_B [min]	t_A [min], podpis	OTK
010	4121	8	Soustružit ϕ 139,32 + 0,3, nákržky ϕ 90 +0,3, otvor na ϕ 39,7 H9, odlehčení, délky a hrany hotově.	20	110	
020	5411	7	Drážku 10 D 10 protáhnout.	10	10	
025	5725	9	Brousit tvarovou frézou. Úhel 37°a rádius 3,3. Upravit z frézy 45° x 100 ČSN 222250.	60	-	
030	5330	8	Závit frézovat, zkrácené osové stoupání 18,841 dodržet.	60	60	
040	5340	9	Řezné drážky frézovat, dělení dodržet. Fréza 30° x 100 ČSN 222242.	40	110	
045	5941	9	Tvarový nůž řezat, přídavek na bok zubů 0,15. Upravit z polotovaru 25 x 25 x 160 ČSN 223690.	180	-	
050	4341	10	Profil a hlavu zubu podsoustružit, zkrácené osové stoupání 18,841 dodržet.	80	160	
060	5220	7	Neúplné zuby odstranit a označení využitelné části frézovat.	20	30	
070	5350	8	Označení frézovat.	20	40	
080	9443	7	Apertura.	5	15	
090	1830	9	Vakuově kalit, třikrát popustit, teploty a prodlevy dle materiálového listu. Operaci provádět ve svislé poloze. Měřit dosaženou tvrdost.	30	110	
100	5522	8	Nákržky a čela na trnu lehce přebrousit.	10	30	
110	5560	10	Otvor ϕ 40 H 5 hotově brousit.	10	60	
120	5760	10	Řezné drážky na čele brousit.	40	40	
125	5941	9	Tvarovou šablonu řezat.	90	-	
130	5733	11	Profil zubu hotově brousit.	90	270	
140	5522	9	Nákržky a čela hotově brousit.	10	30	
150	9443	8	Apertura.	5	15	
-	-		Kontrola dle DIN 3968.		-	
-	-		Povlakování TiN – kooperace.		-	

6 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byla navržena konstrukce a výrobní postup odvalovací frézy pro obrábění vložené hřídele. V jednotlivých kapitolách jsou popsány postupně všechny části konstrukce včetně nezbytných výpočtů pro stanovení všech parametrů pro návrh frézy. Zvláštní pozornost je v teoretické části věnována určení počtu chodů a hřebenů frézy, stanovení geometrie břitu a hřbetních ploch zubů a určení modifikovaného profilu odvalovací frézy pro srážení hran. V oblasti zaměřené na výrobu jsou podrobněji zmíněny specifické výrobní operace a možnosti stanovení rozměrů pro nástroje používané v těchto operacích.

V pojení o určení počtu chodů a hřebenů se práce zaměřuje především na možnosti snížení obráběcího času, při zachování shodné úrovně řezné rychlosti. Jednotlivé možnosti jsou posuzovány z hlediska výkonu a vlivu na kvalitu obráběných ploch. U jednotlivých variant jsou také zohledněny omezující podmínky vyplývající z odvalovacího frézování.

Podkapitola o geometrii břitu se podrobněji zabývá upřesněním tvorby hřbetních ploch zubů frézy s ohledem na broušení profilu kruhovým brusným kotoučem. Důraz je kladen na rozdílnost hřbetu zubů vyráběných podsoustružením a podbroušením. Jedná se hlavně o změnu úhlu hřbetu, velikost skoku vačky a proměnlivé odchylky od Archimédovy křivky. Postupy pro řešení uvedených parametrů nástroje nejsou dostatečně podrobně v literatuře rozebrány. Většina uvedených vztahů je navržena a rozpracována s cílem omezit vzniklou chybu případných aproximací, tak aby výsledek nebyl ovlivněn nežádoucí dodatečnou chybou. Tento přístup je vyžadován postupně zvyšujícími se nároky na přesnost obráběného ozubení a tím i na kvalitu nástroje.

Stále častěji navrhované ozubení s modifikovaným profilem, na které je nutné použít speciální nástroj, vytváří potřebu jednoznačné definovatelnosti profilu nástroje. Postup výpočtu pro tyto nenormalizované profily je podrobně popsán a doplněn o vlivy specifických konstrukčních parametrů ozubení v kapitole 3.

Konkrétní konstrukční návrh frézy je veden snahou o dosažení příznivých ekonomických výsledků v procesu obrábění a přiměřenými požadavky na jeho zhotovení. Určení základního profilu nástroje je provedeno se záměrem alternativního využití frézy také pro obrábění spoluzabírajících kol. Při stanovení počtu chodů a hřebenů frézy byl pro nejehospodárnější řešení posuzován výkon a životnost nástroje. Výpočet řezné drážky je zaměřen především na výrobní a pevnostní omezení.

V kapitole technologie výroby odvalovací frézy jsou podrobněji zmíněny operace podsoustružení a broušení profilu frézy s ohledem na dosažení maximální přesnosti nástroje.

V případě podsoustružení je popis operace doplněn výpočtem tvarového nože. Operace podbrušování profilu je rozšířena o výpočet přesného osového tvaru brusného kotouče. Využití přesně definovaného tvaru kotouče k současnému broušení celého profilu zubu frézy přispívá k minimalizaci vnesených chyb.

Odvalovací frézy na výrobu ozubení patří mezi tvarově složitější nástroje, jejichž konstrukční a technologické řešení vyžaduje celkový pohled na daný případ obrábění. Obecné poznatky z problematiky odvalovacího frézování a návrhu frézy lze využít v následné konstrukci libovolné odvalovací frézy. Další možné uplatnění uvedených poznatků spadá například do oblasti konstrukce měřidel a přípravků.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Ivanu Mrkvicovi za odborné vedení a vstřícný přístup, který mi v průběhu psaní této práce poskytoval.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BARTOŠ, J. *Ozubená soukolí valivá a šroubová*. Praha. 1951. 366 s.
- [2] Katalog fy. BÖHLER S390 2001. 14 s.
- [3] Katalog fy. FETTE – *Verzahnungs-werkzeuge* Printed in Germany. 199 s. No. 1577 (0104 1 DTP/GK)
- [4] MORAVEC, V. *Konstrukce strojů a zařízení II*. Ostrava: MONTANEX a.s Ostrava. 2001. 291 s. ISBN 80 – 7225 – 051 – 5.
- [5] SCHMITD, E. A kol. *Příručka řezných nástrojů*. Praha: SNTL Praha. 1974. 580 s.
- [6] ŠVEC, S. *Konstrukce nástrojů pro výrobu čelních ozubených kol*. Praha. 1965. 364 s.
DT: 621.833.1
- [7] ŠVEC, S. *Konstrukce nástrojů pro výrobu ozubení šnekových soukolí*. Praha. 1966. 164 s.
DT: 621.833.38

Seznam příloh

Příloha A výkres FO – 001